Série E ;
N° d'ordre :
1

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Paule COLLET

PROFESSEUR AGRÉGÉE AU LYCÉE DE JEUNES FILLES DE GRENOBLE

1re THÈSE. — Sur les propriétés détectrices de la galène.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 17 Mars 1921 devant la Commission d'examen.

MM. MULLER..... *Président.*
ROTHÉ ..... } *Examinateurs.*
LABROUSTE..... }

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1921

Série E ;
N° d'ordre :
1

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Paule COLLET

PROFESSEUR AGRÉGÉE AU LYCÉE DE JEUNES FILLES DE GRENOBLE

1re THÈSE. — Sur les propriétés détectrices de la galène.

2e THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le Mars 1921 devant la Commission d'examen.

MM. MULLER..... *Président.*
ROTHÉ ..... } *Examinateurs.*
LABROUSTE..... }

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1921

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Doyen	E. BATAILLON	Professeur de Biologie générale.
Professeurs	A. DENJOY	Mathématiques générales.
	G. VALIRON	Calcul différentiel et intégral.
	H. VILLAT	Mécanique.
	M. FRÉCHET	Analyse supérieure.
	E. ESCLANGON	Astronomie.
	P. WEISS	Physique générale.
	H. OLLIVIER	Physique générale.
	E. ROTHÉ	Physique du Globe.
	P. MULLER	Chimie générale et chimie physique.
	L. HACKSPILL	Chimie minérale.
	H. GAULT	Chimie organique.
	E. TOPSENT	Zoologie et Anatomie comparée.
	C. HOUARD	Botanique.
	E. TERROINE	Physiologie générale.
	J. DE LAPPARENT	Pétrographie.
	M. GIGNOUX	Géologie et Paléontologie.
Secrétaire	A. RENARD	

A la Mémoire de mon Père

Jean COLLET

DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE GRENOBLE

A MON MAÎTRE

EDMOND ROTHÉ

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE STRASBOURG
DIRECTEUR DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548023_0064

SUR

LES PROPRIÉTÉS DÉTECTRICES DE LA GALÈNE

Par Paule COLLET

Professeur agrégée au lycée de jeunes filles de Grenoble

INTRODUCTION

La réception des ondes hertziennes nécessite essentiellement l'emploi d'un détecteur, c'est-à-dire d'un appareil susceptible de transformer en un courant de sens constant les trains d'ondes de haute fréquence. C'est en cela que consiste le phénomène de la *rectification*.

Si l'on étudie les variations d'intensité d'un courant continu qui traverse un détecteur, en fonction de la différence de potentiel aux bornes, la courbe obtenue, dite « *caractéristique* du détecteur », *n'est pas une droite*. C'est là une condition évidemment nécessaire et d'ailleurs suffisante des propriétés rectifiantes, comme on peut le démontrer par le raisonnement et le vérifier par l'expérience.

Donc *un détecteur est un conducteur qui ne suit pas la loi d'Ohm*.

Jusqu'en 1914, les détecteurs utilisés pratiquement sont, le plus souvent, le détecteur électrolytique du général Ferrié, ou des détecteurs à cristaux. Parmi ces derniers, un des plus simples est le détecteur à galène, constitué par un cristal de cette substance dit cristal « sensible », sur lequel appuie une pointe métallique.

Si l'appareil est simple, le phénomène ne l'est pas : l'existence de galènes sensibles et de galènes qui ne le sont pas, mais dont certaines peuvent être sensibilisées par voie chimique ; la présence côte à côte, sur une même face de cli-

vage, de points sensibles et de points non sensibles ; tous ces faits manifestent l'action de facteurs physiques et chimiques qui viennent singulièrement compliquer le phénomène.

Pendant la guerre, le grand développement pris par la T. S. F., les recherches nombreuses faites sur les lampes à trois électrodes ont détourné l'attention des galènes détectrices. Cependant elles sont d'un emploi si commode, elles nécessitent un matériel si réduit eu égard aux résultats fournis qu'elles restent un élément fondamental de l'appareillage de T. S. F. Il y a donc un intérêt théorique et pratique à élucider leur fonctionnement, ce qui reste à faire malgré le grand nombre des recherches qui ont déjà été effectuées.

Le travail qui suit est essentiellement consacré aux détecteurs à galène. J'indiquerai tout d'abord brièvement les études antérieures faites sur les contacts solides rectifiants.

Je développerai ensuite les principaux points de mes recherches personnelles.

Elles portent sur l'étude électrique des propriétés rectifiantes : action du courant continu ; établissement des caractéristiques permettant de prévoir les qualités détectrices des cristaux ; action des courants alternatifs ou variables, des ondes entretenues, et des trains d'ondes amorties. Tout ceci caractérise les propriétés des détecteurs à galène, et précise leurs meilleures conditions d'emploi.

Certains phénomènes vibratoires concomitants, rencontrés au cours de ces expériences de détection, seront également étudiés.

Enfin, en serrant de plus près les conditions de la rectification et les propriétés physiques ou chimiques des points sensibles, j'essaierai de formuler une hypothèse qui rende compte des faits constatés.

Ces recherches ont été commencées en 1912, à l'Institut de

physique de Nancy, sous la direction de M. le professeur Rothé, et poursuivies à Grenoble, au laboratoire de M. Vaillant, professeur de physique à la Faculté des sciences. Interrompues par la guerre, elles ont été reprises en 1918, à Grenoble avec du matériel et une subvention de la Direction des Inventions. Je veux en remercier ici M. J. L. Breton, alors directeur des Inventions, depuis ministre de l'Hygiène et M. Maurain, sous-directeur des Inventions, et directeur, à Saint-Cyr, de l'Institut aérotechnique de l'Université de Paris.

Enfin, en 1919 et 1920, j'ai travaillé à Strasbourg, au laboratoire de l'Institut de physique du Globe, où j'ai fait constamment usage des appareils des inventions et de la télégraphie militaire et des travaux effectués pendant la guerre sous la direction du général Ferrié. Je tiens à m'acquitter ici de la dette de reconnaissance que j'ai contractée ainsi envers les chercheurs du 8e génie, que les nécessités de la guerre ont astreint pour la plupart à rester dans l'anonymat. C'est grâce à l'un d'entre eux, mon maître M. Rothé, que j'ai pu bénéficier des recherches faites et des appareils réalisés. Je suis heureuse de le remercier du fond du cœur pour l'aide vivifiante et les encouragements éclairés qu'il n'a cessé de me donner au cours de ce travail.

HISTORIQUE

Ferdinand Braun a signalé dès 1874 (1) que certains sels métalliques présentent une conductibilité unipolaire et s'écartent par suite de la loi d'Ohm. Les sels étudiés sont des sulfures, des oxydes et en particulier un sel complexe formé de protoxyde et de bioxyde de manganèse, de soude ou de baryte, appelé « psilomelan ».

(1) Braun. *Annalen der Physik*, 1874, p. 556; 1877, p. 95; 1878, p. 476; 1883, p. 340.

Braun constate que la résistance de ces substances dépend de l'intensité, du sens du courant et des dimensions des pièces métalliques servant à assurer le contact. Il signale, dans les variations de résistance, une analogie marquée avec les phénomènes auxquels donnerait lieu une pellicule gazeuse, et il écarte toute explication thermoélectrique ou électrolytique.

A la même époque, Schuster, Adam et Siemens observent des phénomènes analogues avec les contacts métalliques imparfaits, ou les contacts métal-sélénium et métal-bismuth.

Contacts métalliques. — Quelques années plus tard, des découvertes successives permettent de réaliser pratiquement l'émission et la réception d'ondes électriques. L'appareillage primitif de la télégraphie sans fil utilise le *cohéreur* de Branly, découvert autour de 1890.

Comme les sulfures et les oxydes, le cohéreur présente une conductibilité unipolaire, mais, à la différence de ces derniers, il est constitué par des contacts métalliques imparfaits.

L'emploi du cohéreur en radiotélégraphie provoque de nombreuses recherches sur les contacts métalliques, dont certaines, en particulier celles de Branly (1) se poursuivent jusqu'à une date toute récente. Citons les travaux de Schneider et Robinson (2), de Fisch (3), de Taylor (4) et de Blanc (5) ; plus récemment encore, ceux d'Austin (6) et d'Eccles (7).

(1) Branly. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1890, t. III, p. 785 ; 1915, t. CLXI, p. 759 ; 1916, t. CLXIII, p. 943 ; 1917, t. CLXV, pp. 450 et 524, etc.

(2) Schneider et Robinson. *Annalen der Physik*, 1903, p. 754.

(3) Fisch. *Journal de Physique*, 1904, t. III, p. 350.

(4) Taylor. *Physical Review*, 1902, t. XV, p. 39 ; 1903, t. XVI, p. 199.

(5) Blanc. *Journal de Physique*, 1904, t. III, p. 756 ; 1905, t. IV, p. 743.

(6) Austin, *Physical Review*, 1907, t. XXIV, p. 508 ; *Physikalische Zeitschrift*, 1907, p. 600 ; 1911, p. 847.

(7) Eccles. *Philosophical Magazine*, 1910, t. XIX, p. 869 ; t. XX, p. 129.

Fisch et Robinson établissent des caractéristiques de contacts métalliques imparfaits. Schneider insiste sur les adhérences produites par la cohération, comme Lodge (1) l'avait fait dès le début ; et, développant la théorie de ce dernier, il voit dans la cohération une fusion des métaux, ou tout au moins la formation de « ponts » constitués par des particules métalliques que le courant soude les unes aux autres ; ces soudures ou ces ponts expliquent les chutes de résistance.

Taylor remarque surtout la diversité des modes de fonctionnement d'un cohéreur suivant les voltages utilisés, et il conclut à une conductibilité par des ions métalliques dans les conditions normales d'emploi.

L'étude de Blanc met en évidence le rôle de la couche de passage entre les métaux, couche qui, sous l'action du courant, varie d'épaisseur (comme Lodge l'admettait déjà) et dont les ions positifs diffusent dans le sens du champ.

Eccles voit l'origine des propriétés rectifiantes dans des variations thermiques de résistance de la couche d'oxyde interposée entre les métaux.

D'après Branly, la conductibilité unipolaire est due à ce que la couche diélectrique interposée entre les surfaces métalliques devient conductrice sous l'action du champ. Après de nombreuses expériences portant sur des couches d'air ou de mica, Branly trouve qu'il n'y a pas perforation par des ponts, et il conclut à une « influence spécifique à distance des surfaces métalliques ». Ceci rappelle un peu « l'atmosphère d'électrons » constatée par Rother (2) au voisinage des métaux.

Contacts cristallins. — Parallèlement à l'étude des contacts métalliques, d'autres recherches ont été poursuivies relativement aux solides semi-métalliques et aux sels con-

(1) Lodge. *Philosophical Magazine*, 1894, t. XXXVII, p. 94.
(2) Rother. *Annalen der Physik*, 1914, t. XLIV, p. 1268.

ducteurs susceptibles de présenter le phénomène de polarité découvert par Braun. Suivant les cas, deux tendances peuvent orienter ces travaux. Tantôt le but poursuivi est l'étude de la conductibilité propre d'une substance prise en masse compacte. Tantôt les recherches sont faites en vue de la télégraphie sans fil ; les montages adoptés sont ceux des détecteurs et l'on étudie les cristaux en tant que redresseurs de courant.

1) Parmi les travaux se rattachant à cette première tendance, je ne cite que pour mémoire tous ceux qui portent sur le sélénium, le tellure, le silicium, l'antimoine et surtout le *bismuth*. Ce dernier subit de grandes variations de résistance liées à l'effet Hall, dont Lénard, Pallme-König, Seidler, Geipel et d'autres encore, se sont spécialement occupés (1). Heaps (2) et Tissot (3) ont du reste signalé des phénomènes analogues présentés par certains sels.

L'étude des *sels métalliques* a été faite en Allemagne surtout, en particulier par Königsberger, Schilling et J. Weiss (4) et par Streintz, Wellick et Wesely (5).

Königsberger étudie les variations de résistance avec la chaleur, la conductibilité thermique et les phénomènes thermo-électriques. Aux faibles potentiels il trouve que les oxydes et les sulfures se comportent comme des métaux, et que, par suite, l'hypothèse des électrons libres rend compte des phénomènes observés. Aux potentiels plus élevés il en est autrement, et c'est aussi le cas, dès les faibles potentiels, pour certains cristaux et certains corps de la série aroma-

(1) Lenard, Pallme-König, Seidler, Geipel. *Annalen der Physik*, 1890, 1907, 1910, 1912.

(2) Heaps. *Philosophical Magazine*, 1912, t. XXIV, p. 813.

(3) Tissot. *C. R.*, 1913, t. CLVI, p. 1523

(4) Königsberger, Schilling, J. Weiss. *Annalen der Physik*, 1910, t. XXXII, p. 179 ; 1911, t. XXXV, p. 1.

(5) Streintz, Wellick, Wesely. *Annalen der Physik*, 1914, t. XLIV, p. 545 ; *Phys. Zeit.*, 1911, p. 845 ; 1912, p. 673 ; 1913, p. 76 ; 1920, p. 42.

tique. Une polarisation et une conductibilité unipolaire deviennent alors manifestes. Il faut, pour expliquer les résultats expérimentaux, admettre l'existence d'ions et d'électrons à demi-libres, que les atomes peuvent abandonner. Il y a là une espèce de conductibilité électrolytique.

Streintz étudie dès 1900 la conductibilité des poudres comprimées, puis il passe aux cristaux. Il distingue la résistance propre du cristal des résistances de contact. Ces dernières dépendent de la pression et décroissent exponentiellement quand la température croît. Streintz les attribue à une couche gazeuse qui lui paraît expliquer toutes leurs variations par des phénomènes de polarisation, des « condensateurs moléculaires » et des expulsions de bulles d'air. Au contraire la résistance propre du cristal est faible et varie avec la température comme celle d'un métal. Je reviendrai sur les idées de Streintz dans l'étude critique des hypothèses.

2) Ce sont plus spécialement des Américains et des Français qui ont étudié les cristaux en tant que détecteurs.

Les premières en date des recherches importantes sont dues à Pierce [1]. Il s'occupe successivement du carborundum, de la molybdénite et des pyrites de fer. Dans les trois cas il trouve des caractéristiques dissymétriques. Pour étudier de près les propriétés rectifiantes, Pierce établit des diagrammes oscillographiques au moyen d'un tube de Braun. Les variations de résistance étant assez rapides pour suivre un courant alternatif de fréquence 120, il ne semble pas qu'on puisse les attribuer à des phénomènes thermoélectriques. De plus le décalage de phase qu'on observe est entièrement imputable à la résistance introduite et à la modification par un terme exponentiel de la courbe sinusoï-

(1) Pierce. *Physical Review*, 1907, t. XXV, p. 31 ; 1909, t. XXVIII, p. 151 ; 1909, t. XXIX, p. 478.

dale. Donc on ne peut invoquer l'existence d'une polarisation galvanique.

Pierce conclut qu'il faut chercher l'explication à la fois des phénomènes rectifiants et des phénomènes thermoélectriques, dans des électrons diffusant plus facilement dans un sens que dans l'autre et dont la vitesse varie avec la température.

Que la thermoélectricité n'explique pas les propriétés rectifiantes, c'est aussi l'opinion de Leimbach (1) qui trouve l'énergie des ondes bien trop faible pour justifier des courants thermiques aussi intenses. Et Brandes (2), conformément à l'opinion des physiciens allemands, rapproche les phénomènes de détection de ceux que présentent les gaz.

Les travaux de Tissot (3) conduisent à un classement des détecteurs en deux catégories. La première comprend les « détecteurs thermoélectriques » qui fonctionnent sans force électromotrice auxiliaire, à condition que les dimensions des contacts soient réduites. Le sens de la rectification varie avec le signe du pouvoir thermoélectrique des substances en contact. Parmi ces détecteurs citons ceux à chalcopyrite, à sulfure de cuivre, à bioxyde de manganèse, et le contact tellure-silicium. Austin regardait déjà les cohéreurs métalliques à surfaces oxydées comme des redresseurs thermoélectriques.

Le second groupe établi par Tissot comprend les autres détecteurs qui fonctionnent mieux, en général, avec force électromotrice auxiliaire, la caractéristique présentant un coude en dehors de l'origine. Pour ceux-ci les contacts peuvent être de dimensions quelconques. D'ailleurs on ne constate aucune polarisation ; il n'y a qu'un effet de contact analogue à celui que Blanc a mis en évidence pour les

(1) Leimbach, *Physikalische Zeitschrift*, 1911, p. 228.
(2) Brandes. *Beiblætter der Annalen*. 1907, t. XXXI, p. 349.
(3) Tissot. *C. R.*, 1908, t. CXLIII, pp. 37 et 237. *Journal de Physique*, 1910, t IX, p. 887.

cohéreurs. Dans cette catégorie Tissot range les détecteurs métal-molybdénite, métal-carborundum, zincite-chalcopyrite.

Nous trouvons enfin un ensemble de travaux américains portant sur les conditions de la rectification, et concluant tous, dans la mesure où ils se permettent des considérations théoriques, à la formation au contact d'une mince pellicule à conductibilité unipolaire. Flowers (1) étudie le rôle des variations d'intensité, de voltage, de fréquence, l'action de la température et l'influence des conditions de contact sur les galènes détectrices. Il trouve que les phénomènes thermo-électriques ne peuvent rien expliquer.

Godard (2) met en évidence pour le tellure, et même pour la galène et le carbone, le rôle de l'oxygène dans la rectification. Hartsough (3) se spécialise dans l'étude du détecteur carbone-silice, et Hunt et Whittemore (4) cherchent l'influence de la température, de la pression et de l'humidité sur les détecteurs à galène, à silice et à carborundum. De ces travaux rien de très net ne se dégage.

Signalons enfin une étude théorique de Audubert (5) sur les caractéristiques et sur les diverses hypothèses généralement présentées pour expliquer la détection. Je reviendrai sur ces hypothèses quand j'essaierai d'esquisser une théorie des phénomènes.

CHAPITRE PREMIER

LAMES CRISTALLINES

Avant d'aborder l'étude des galènes détectrices qui sont essentiellement des conducteurs ne suivant pas la loi d'Ohm,

(1) Flowers. *Physical Review*, 1909, t. XXIX, p. 445 ; 1914, t. III, p. 25.
(2) Goddard. *Physical Review*, 1912, t. XXXIV, p. 149.
(3) Hartsough. *Physical Review*, 1914, t IV, p. 306.
(4) Hunt et Whittemore. *Physical Review*, 1916, t. VII, p. 518.
(5) Audubert. *Journal de Physique*, 1917, t. VII, pp. 127 et 172.

j'ai voulu savoir si la résistance des cristaux utilisés dans les contacts rectifiants demeure constante, lorsque les conditions de montage sont telles que ces cristaux ne fonctionnent pas comme détecteurs. Je vérifiais qu'il en était ainsi en amenant l'antenne d'un vibrateur (1) au voisinage d'un circuit oscillant constitué par le cristal dans sa monture, une self de quelques spires de gros fil de cuivre, et une capacité de 0,002 microfarad, aux bornes de laquelle était branché un téléphone.

Dans ces conditions j'ai étudié la galène, la pyrite de fer, la chalcosine, la chalcopyrite, les sulfures de molybdène et de bismuth, la pyrolusite, la zincite et le tellure.

Des lames de 1 à 3 mm. d'épaisseur et de 8 à 12 mm. de côté ont été taillées dans des masses cristallisées de ces substances. Ces lames sont serrées entre des plateaux métalliques servant d'électrodes et qui, autant que possible, sont faits du métal dont le cristal est un sel. On s'efforce de réaliser sur les deux faces des contacts identiques, et cette symétrie exclut, comme c'était à prévoir, tout phénomène de détection. Le serrage du cristal est assuré dans un des appareils par des poids, ce qui permet une mesure approchée de la pression, et dans un autre par des vis. Le premier montage a permis d'étudier l'action de la pression sur les résistances; une fois cette action connue, le second montage a été le plus fréquemment employé.

La différence de potentiel e aux bornes du cristal est déterminée le plus souvent par la charge d'un condensateur que l'on décharge dans un galvanomètre balistique Siemens et Halske.

Le courant i qui traverse le cristal est mesuré au milliampèremètre, s'il passe pendant un temps appréciable; dans le cas contraire, on le détermine au moyen d'une seconde

(1) V. Rothé, *Les applications de la T. S. F.*, p. 105.

mesure balistique, le condensateur étant chargé aux bornes d'une résistance connue R.

La concordance des valeurs trouvées étant en général suffisante, chaque résultat est la moyenne de 4 à 5 mesures successives. On trouve que i croît toujours avec e ; la *résistance* apparente mesurée par

$$\frac{e}{i}$$

n'est pas constante et décroît lorsque e croît.

D'autre part, il se produit des phénomènes d'*hystérésis*. L'application aux bornes du cristal, dans des conditions déterminées, d'une différence de potentiel donnée crée un courant dont la grandeur dépend des courants qui ont antérieurement traversé le cristal dans le même montage ; lorsqu'un courant croissant a diminué la résistance, celle-ci reste inférieure à sa valeur primitive quand le courant décroît.

Il a donc paru nécessaire de faire deux catégories d'expériences en faisant varier la durée de passage du courant.

§ 1. — *Faibles durées*

Dans les premières expériences une différence de potentiel connue et variable est appliquée pendant un temps très court, et d'ailleurs variable, aux bornes du cristal. On mesure l'intensité du courant par la méthode balistique. Le dispositif est figuré sur le schéma suivant (fig. 1).

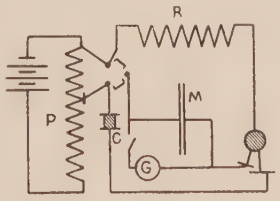

Figure 1.

Un potentiomètre P fournit les différences de potentiel variables ; une clé de renversement permet d'ailleurs de les appliquer dans un sens ou dans l'autre aux bornes du cristal C. L'interrupteur est un pendule analogue à celui de Blondlot pour les expériences de polarisation. Le disque de cuivre du pendule est muni à sa

partie inférieure de deux lamelles de clinquant qui frottent sur deux lames de cuivre pour établir les contacts. Un jeu de lames de 2 à 11 cm. de long permet de faire varier la durée des contacts.

Dans chacun des cas la plus grande des deux lames sert à appliquer la différence de potentiel aux bornes du cristal ; la seconde, plus courte par les deux bouts, sert à charger le condensateur M. Suivant les connexions ce condensateur est relié soit aux bornes d'une résistance connue R, soit aux bornes du cristal ; le contact avec la capacité est établi après que le courant a été lancé dans le cristal, et rompu avant que ce courant cesse. On connaît ainsi i et e.

Dans ces conditions *il n'y a pas d'hystérésis*, et l'on obtient les résultats suivants :

1) Les cristaux étudiés *ne suivent pas la loi d'Ohm* ; la résistance n'est pas constante.

2) Par renversement de la différence de potentiel, on obtient un courant *symétrique* du premier. La conductibilité moyenne n'est donc pas unipolaire. Si certains points prétent des dissymétries, elles se trouvent masquées dans l'ensemble. D'ailleurs les cristaux ainsi montés ne fonctionnent pas comme détecteurs.

3) Dans les limites de temps où j'opérais, de $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{3}$ de seconde, je n'ai pas pu mettre en évidence une action de la durée de passage du courant sur la résistance.

4) Les « caractéristiques » des contacts, ou courbes de variation de l'intensité en fonction de la différence de potentiel aux bornes, sont très voisines d'*arcs de parabole* dont l'équation est de la forme :

$$i = ae^2 + be.$$

Avec le tellure, la chalcopyrite, la chalcosine, la zincite et certains des échantillons de galène, les courbes expérimentales se confondent avec les courbes théoriques.

Pour un échantillon de chalcopyrite par exemple, le coeffi-

cient a variant suivant les montages de 0,03 à 0,02, b varie de 1,3 à 0,26.

Avec un échantillon de zincite,

$$a = 0{,}0065\,; \qquad b = 0{,}01.$$

5) Si les surfaces de contact des plaques métalliques avec les lames de cristal décroissent, a et b diminuent, la résistance augmentant ; mais le rapport $\frac{a}{b}$ demeure sensiblement constant.

Par exemple un échantillon de chalcopyrite est monté une première fois entre deux lames débordant le cristal, et une seconde fois entre deux plaques d'ébonite présentant au centre deux petits contacts métalliques. Les conditions de serrage sont les mêmes. On obtient la première fois :

$$i = 0{,}026e^2 + 1{,}3e \qquad \frac{a}{b} = 0{,}02 \qquad r = \frac{0{,}77}{1 + 0{,}02e}\,;$$

et la seconde fois :

$$i = 0{,}0186e^2 + 0{,}906e \qquad \frac{a}{b} = 0{,}0206 \qquad r = \frac{1{,}1}{1 + 0{,}0206e}.$$

Les résistances varient donc proportionnellement dans les deux cas.

6) L'accroissement de pression des contacts tend à diminuer la résistance, c'est-à-dire à accroître a et b. Mais $\frac{a}{b}$ décroît, donc les variations de résistance avec la différence de potentiel deviennent moins marquées, et *la caractéristique se rapproche d'une droite*. Cet effet s'atténue quand la pression croît beaucoup.

Avec un échantillon de chalcopyrite par exemple, on a, aux faibles pressions :

$$i = 0{,}026e^2 + 0{,}48e \qquad \frac{a}{b} = 0{,}054\,;$$

et aux fortes pressions :

$$i = 0{,}0186e^2 + 0{,}906e \qquad \frac{a}{b} = 0{,}0206.$$

Avec un échantillon de chalcosine on a :

$$i = 0{,}029e^2 + 0{,}07e \qquad \frac{a}{b} = 0{,}41;$$

aux moyennes pressions, et aux fortes pressions :

$$i = 0{,}044e^2 + 0{,}11e \qquad \frac{a}{b} = 0{,}40.$$

§ 2. — *Durées prolongées*

Une seconde catégorie d'expériences a été faite pour étudier l'action d'un courant prolongé sur la résistance des cristaux.

Pour cela le cristal C, toujours serré entre deux lames de métal, est traversé par un courant d'excitation que l'on obtient en appliquant une différence de potientiel E aux bornes. E est mesuré balistiquement et varie de 0,2 à 3 volts ; la durée d'excitation varie de 30 secondes à 10 minutes : une clé permet de renverser le sens du courant.

Périodiquement, avant l'excitation et au cours de celle-ci, on mesure la résistance de la lame cristalline par application aux bornes d'une petite différence de potentiel connue e, le faible courant produit traversant le galvanomètre. e est mesuré au moyen d'un voltmètre, et varie de 0,04 à 0,4 volt. Le quotient $\frac{e}{i}$ donne la résistance r. Le montage est figuré sur le croquis ci-contre (fig. 2).

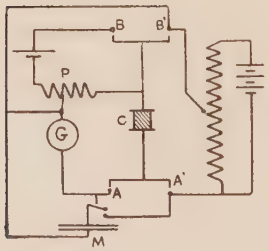

Figure 2.

La clé AA'BB' permet d'appliquer aux bornes du cristal soit E, soit e. Dans le premier cas, E est mesuré par le microfarad M qui se décharge dans le galvanomètre G au moyen d'une clé de Morse. Dans le deuxième cas le contact A est fermé en premier lieu pour voir s'il y a une force électromotrice résiduelle aux bornes du cristal ; puis le contact B est fermé, et e est appliqué aux bornes du cristal.

Les expériences ont porté sur les mêmes lames cristallines que précédemment. Les résultats sont les suivants :

1) Le *sens du courant* excitateur est *sans action* sur la résistance du cristal qui ne dépend pas non plus du sens du courant de mesure. Ce résultat était à prévoir, étant donnés la symétrie des contacts et l'effet de moyenne.

2) Dans l'ensemble les *résistances décroissent* lorsque le potentiel de l'excitation et la durée de celle-ci croissent. Ces variations sont plus ou moins régulières et plus ou moins durables selon les cristaux, comme on va le voir.

3) Certains des cristaux présentent des forces électromotrices résiduelles, après cessation de l'excitation. Ces f. é. m. sont, en général, temporaires comme les variations de résistance.

Des essais préliminaires ayant montré l'influence prépondérante des *conditions de contact*, j'ai été conduite à faire deux séries de mesures. Dans l'une les électrodes sont des plaques métalliques polies faites, si possible, du métal dont on étudie un sel (cuivre, fer, zinc ou plomb) ; dans l'autre les électrodes sont des lames de zinc ou de plomb fortement amalgamées (1) à l'avance par les procédés habituels.

Première série. — Les résultats sont souvent irréguliers.

Avec la zincite on obtient des variations brusques et temporaires de la résistance qui passe pour un échantillon de $1{,}3 \times 10^6$ ohms à $0{,}65 \times 10^6$ ohms, après quelques minutes d'excitation sous 1,5 volt.

Un autre échantillon passe de 53×10^6 à 5×10^6 ohms.

Avec la galène on a de même de très brusques variations de résistance qu'il faut attribuer à l'amélioration des contacts ; mais ici ces variations sont plus durables. Un échantillon passe de 20 à 15,7 ohms après 6 minutes d'excitation sous

(1) *C. R.*, 1914, t. CLVIII, p. 1994.

3 volts. Pour une autre lame les valeurs de la résistance, au cours de l'excitation, sont les suivantes :

Durée de l'excitation en minutes	Résistance en ohms
0	68
1	47,5
2	43
4	41,3
6	40,9
8	40,8

Avec certains des cristaux la résistance est réduite de façon progressive par l'excitation. L'effet dépend alors de la durée et du potentiel d'excitation ; il atteint son maximum après 6 ou 8 minutes.

Par exemple, la différence de potentiel E étant de 3 volts, la résistance varie au maximum de $\frac{1}{4}$ de sa valeur avec le sulfure de molybdène, le sulfure de bismuth et la pyrite de fer, et de $\frac{1}{3}$ avec la chalcopyrite.

Si E = 1,5 volt l'effet est insensible sur la pyrite de fer et la chalcopyrite, tandis que la variation de résistance atteint $\frac{1}{6}$ pour le sulfure de molybdène et $\frac{1}{11}$ pour le sulfure de bismuth.

Cet effet persiste en partie. Avec les sulfures de molybdène et de bismuth $\frac{1}{4}$ environ de la variation demeure ; avec la pyrite de fer $\frac{1}{5}$; avec la chalcopyrite la résistance revient presque à sa valeur initiale.

En tout cas, après cessation de l'excitation, le retour à la valeur stable de la résistance s'effectue d'après une loi exponentielle en fonction du temps. Avec le sulfure de bismuth et la chalcopyrite en particulier, les courbes obtenues pour divers potentiels d'excitation s'échelonnent les unes au-dessus des autres avec une parfaite régularité.

Le sulfure de bismuth et la pyrite de fer donnent seuls, de façon nette, une *force électromotrice résiduelle* sensible. Son maximum est 5×10^{-3} volts. Elle est de sens inverse au courant excitateur. Elle s'évanouit vite avec le sulfure de bismuth qui est très résistant (8×10^{6} ohms) et persiste au contraire plusieurs minutes pour deux échantillons de pyrite de fer dont les résistances respectives sont 27.000 et 28.000 ohms.

Deuxième série. — Les électrodes étant amalgamées, on constate que les résistances des plaques sont *beaucoup plus faibles* : 20.000 ohms au lieu de 8.000.000 pour un échantillon de sulfure de bismuth ; 434 et 500 ohms au lieu de 27.000 et 28.000 pour deux échantillons de pyrite de fer.

Les résistances mesurées dans le premier cas étaient donc au moins pour les $\frac{9}{10}$ *des résistances de contact.*

De plus les résistances ont acquis une grande *constance* et ne varient presque plus par excitation. Par contre les forces électromotrices résiduelles se manifestent d'autant plus nettement que les résistances des plaques cristallines deviennent moindres, et que les irrégularités d'expériences se font plus rares. Anssi faut-il, lorsqu'on veut étudier la diminution de résistance au moyen des déviations du galvanomètre, éliminer les variations dues à la f. é. m. résiduelle, dont l'effet tantôt s'ajoute au courant de mesure et tantôt s'en retranche.

Le courant excitateur n'influe pas sur la résistance de divers échantillons de zincite (de 30 à 100 ohms) non plus que sur la molybdénite, la pyrolusite et le tellure.

Avec des échantillons de galène on a, par excitation, une très légère diminution de la résistance qui était initialement de 0,2 à 0,5 ohm suivant les échantillons.

La diminution de résistance devient sensible avec la pyrite de fer, le sulfure de bismuth, la chalcosine (de 121 à 118 ohms après 8 minutes d'excitation sous 1,5 volt).

Elle est plus nette encore avec la chalcopyrite qui passe de

0,32 ohm à 0,3 après 5 minutes d'excitation sous 1,5 volt, puis à 0,27 après 5 minutes sous 3 volts.

En général cependant les variations de résistance ne dépassent pas 5 o/o. Comme dans la première série d'expériences, la diminution de résistance atteint son maximum après 5 à 6 minutes d'excitation. La variation est temporaire ; le retour à la résistance initiale s'effectuant suivant une loi exponentielle en fonction du temps.

De ces variations progressives et temporaires, il faut du reste distinguer les diminutions notables et durables de la résistance qui se produisent parfois, lors des premières mesures, par simple application d'une différence de potentiel aux bornes du cristal. Il y a là un phénomène de premier établissement du contact. Systématiquement ces premières mesures ont été laissées de côté, et l'on n'a opéré que sur des contacts ayant servi.

Par exemple, lors de l'établissement du courant excitateur, la résistance d'un échantillon de pyrolusite tombe de 67 à 60 ohms, puis demeure constante quelle que soit l'excitation. Il y a eu ici amélioration d'un contact imparfait. Le même phénomène se produit avec un échantillon de chalcosine qui passe ainsi de 196 à 121 ohms.

Quant aux *forces électromotrices résiduelles*, elles demeurent faibles avec la zincite et la molybdénite, et irrégulières encore, bien qu'assez intenses, avec la galène et la pyrolusite (2×10^{-4} volts au maximum).

Avec la chalcopyrite, la chalcosine, la pyrite de fer, le sulfure de bismuth et le tellure, les résultats sont très nets. Les forces électromotrices sont de sens inverse au courant excitateur et égales dans les deux sens. Leur valeur initiale croît régulièrement avec le potentiel et la durée de l'excitation, en atteignant un maximum sous chaque potentiel au bout d'un temps d'excitation qui varie de 2 à 4 minutes. Il y a exception pour le tellure (1).

(1) *C. R.*, 1913, t. CLVI, p. 943.

Pour un potentiel d'excitation de 3 volts par exemple, ces maxima s'échelonnent de $0{,}16 \times 10^{-3}$ pour le sulfure de bismuth, à $1{,}4 \times 10^{-3}$ volts pour la chalcosine. Ils sont sensiblement proportionnels au potentiel d'excitation.

Après cessation de l'excitation, ces f. é. m. résiduelles décroissent exponentiellement en fonction du temps. Quels que soient la durée et le potentiel de l'excitation, le temps θ nécessaire pour que la f. é. m. soit réduite de moitié est à peu près constant pour chaque lame étudiée.

Voici quelques résultats à titre d'exemples :

e mesure en volts la f. é. m. résiduelle ;

E la différence de potentiel d'excitation ;

T la durée, en minutes, de l'excitation ;

t le temps écoulé, en secondes, depuis la fin de l'excitation ;

θ est aussi mesuré en secondes.

Tellure : $E = 3 \quad \theta = 60$

$$e = 0{,}355 \times 10^{-3} \times 1{,}175^{T} \times 1{,}0116^{-t}$$

Sulfure de bismuth : $E = 3 \quad T \geqslant 4 \quad \theta = 10$

$$e = 0{,}1616 \times 10^{-3} \times 1{,}0718^{-t}$$

Chalcopyrite : $T \geqslant 1 \quad \theta = 20$

$e = 0{,}072 \times 10^{-3} \times 1.0353^{-t}$ si $E = 1{,}5$

$e = 0{,}1665 \times 10^{-3} \times 1{,}0353^{-t}$ si $E = 3$

Pyrite de fer : $T \geqslant 1 \quad \theta = 30$

$e = 0{,}1334 \times 10^{-3} \times 1{,}0233^{-t}$ si $E = 1{,}5$

$e = 0{,}24 \times 10^{-3} \times 1{,}0233^{-t}$ si $E = 3$

Chalcosine : $T \geqslant 4 \quad \theta = 30$

$e = 0{,}654 \times 10^{-3} \times 1{,}0233^{-t}$ si $E = 1{,}5$

$e = 1{,}38 \times 10^{-3} \times 1{,}0233^{-t}$ si $E = 3$

Remarques. — Dans les expériences qui viennent d'être décrites, les cristaux ne fonctionnent pas comme détecteurs en l'absence de force électromotrice auxiliaire. Cependant ils s'écartent déjà de la loi d'Ohm, et l'on peut penser que ces écarts ont la même origine que ceux qui nous permettront plus tard, avec d'autres montages, d'utiliser les cris-

taux à la rectification des courants alternatifs. Quelle peut être la cause de ces écarts ?

1) Comme nous l'avons vu, si les cristaux sont serrés entre des plaques amalgamées, la caractéristique devient presque rectiligne, et du même coup la résistance tombe environ au dixième de sa valeur primitive. Il semble donc que les *résistances de contact* aient une importance prépondérante dans les résistances totales mesurées par $\frac{e}{i}$ et dans leurs variations. Ce serait surtout aux phénomènes de contact qu'on devrait attribuer la forme parabolique des caractéristiques.

Cette manière de voir est confirmée par l'extrême complexité des phénomènes que présentent les résistances cristallines dès que les contacts sont mauvais, c'est-à dire lorsque les plaques sont friables, insuffisamment polies (pyrolusite), ou vernissées par le polissage (zincite). Les résistances sont alors très grandes ; le courant excitateur peut les réduire dans d'énormes proportions ; les phénomènes sont instables, irréguliers, et la moindre modification de serrage des plaques change complètement les résultats.

L'action de la *pression* sur la résistance des lames confirme encore cette hypothèse. On a vu en effet que, tant que le contact n'est pas assuré, c'est-à-dire jusqu'à une certaine valeur minima, la pression agit, mais de façon irrégulière. Puis, la pression croissant, l'effet devient presque insensible jusqu'au moment où il y a rupture des cristaux. Ici encore nous trouvons des phénomènes irréguliers tant que les contacts sont mal assurés, et des phénomènes réguliers et plus simples ensuite ; donc les contacts ont une importance essentielle.

2) Une explication faisant intervenir un phénomène de *polarisation* ou de *thermoélectricité* semble devoir être écartée. Tout d'abord la symétrie des contacts la rend difficilement acceptable. Ensuite, dans ces deux hypothèses, il est naturel de penser que la quantité d'électricité mise en jeu

doive intervenir. Or je n'ai pas pu mettre en évidence un effet quelconque de la durée de passage du courant. Il est vrai que cette durée n'a pas été réduite au delà de $\frac{1}{20}$ de seconde. Mais si l'on peut admettre aisément qu'une polarisation soit presque instantanée, il ne semble pas qu'un phénomène thermoélectrique soit terminé aussi rapidement.

Enfin j'ai essayé directement de rechercher l'existence d'une polarisation, et ces expériences ont été, elles aussi, sans résultat.

Tout d'abord, au moyen du pendule, j'ai lancé un courant continu tantôt dans le cristal monté entre deux plaques, tantôt dans un fil de résistance voisine. Entre deux expériences le cristal était dépolarisé au moyen d'un courant alternatif. Les déviations observées au galvanomètre n'ont permis de constater aucune différence entre le cristal avant ou après dépolarisation, et le fil de même résistance.

D'autre part j'ai essayé de mesurer la capacité de polarisation du système constitué par une lame cristalline serrée entre deux plaques métalliques. Pour cela un condensateur de 0,1 microfarad, chargé à un potentiel variable et connu, pouvait se décharger dans un galvanomètre balistique, soit directement, soit à travers le cristal. Aucune différence n'a été constatée entre les deux déviations. Il faut donc en conclure qu'il n'y a pas de phénomène important de polarisation.

Du reste s'il existait une force électromotrice de polarisation, un galvanomètre peu résistant, relié aux électrodes métalliques qui enserrent le cristal, accuserait une déviation. Ceci n'est pas le cas, sauf après le passage d'un courant excitateur qui peut créer des forces électromotrices résiduelles; mais nous avons éliminé des résultats de notre étude cette cause apparente de variation de résistance

D'ailleurs il semble bien, dans certains cas, qu'on puisse rapporter ces f. é. m. résiduelles à un effet Joule intense qui

créerait des forces thermoélectriques. Des expériences faites avec des électrodes de masses inégales, dans des conditions de refroidissement variables, semblent le prouver. Il est possible aussi que ces f. é. m. soient dues à des phénomènes de polarisation produits pendant le passage du courant excitateur. En tout cas l'écart à la loi d'Ohm ne saurait être expliqué par ces f. é. m. résiduelles puisqu'il subsiste après qu'on a défalqué leur effet.

En résumé l'étude des lames cristallines serrées entre deux plaques métalliques a surtout servi à mettre en évidence l'importance prépondérante des résistances de contact.

CHAPITRE II

ÉTUDE DES GALÈNES EN COURANT CONTINU

La galène, dont je vais désormais m'occuper exclusivement, est du sulfure de plomb cristallisé dans le système cubique. Ce minerai peut se présenter sous forme de cubes parfaits. Mais les échantillons triés pour la T. S. F. font en général partie soit de masses cristallines à plans de clivage tabulaires, soit de magmas de cristaux enchevêtrés, d'orientation quelconque. Parfois même une gangue calcaire agglomère ces cristaux. A côté de ces galènes naturelles j'ai utilisé aussi certaines galènes sensibilisées artificiellement.

M. le comte de Gramont a bien voulu examiner au spectroscope plusieurs de mes galènes sensibles. Je donnerai plus loin les résultats de cette étude, faite en utilisant une étincelle de self-induction jaillissant entre deux fragments de galène [1].

Voici la liste des échantillons de galène sur lesquels j'ai travaillé. Pour certains d'entre eux, j'indique la résistance du cristal serré entre deux plaques métalliques et parcouru par un courant de 15 à 20 milliampères.

[1] *Annales de Physique*, 1909, t. XVII, p. 437.

N° 1 et n° 2. — Fragments d'une même galène pure des mines de Pontpéan.

N° 3 et n° 4. — Fragments d'une galène argentifère communiquée par M. Rothé.

N° 5. — Galène ordinaire pure communiquée par M. Rothé. Magma de petits cristaux.

N° 6. — Galène ordinaire pure communiquée par M. Guntz (Nancy).

N° 7 et n° 8. — Galènes communiquées par M. Guntz ; la première est argentifère; la deuxième est antimonique.

N° 12. — Galène sensibilisée communiquée par M. Clarté (Nancy, 1915).

N° 9, n° 11, n° 16, n° 18, n° 19, n° 20. — Galènes naturelles sensibles, fournies en 1915 et 1916 par la maison Picard. Ces échantillons sont des blocs cristallins de clivage facile, présentant de belles faces planes. L'examen au spectroscope montre que ces galènes sont pures. Les résistances des cinq dernières sont respectivement de 83, 72, 60, 66 et 41 ohms.

N° 15. — Galène naturelle sensible, assez analogue aux précédentes, fournie en 1916 par la maison Pellin. Cet échantillon est monté dans un cube de métal. Une seule face, nettement clivée, est libre.

N° 22. — Galène naturelle sensible, fournie en 1918 par la maison Beaudoin. Magma de cristaux moyens très brillants. L'examen au spectroscope montre que cette galène est pure. Résistance : 34 ohms.

N° 21. — Galène naturelle sensible dite galène du Maroc (1917). L'examen au spectroscope révèle, conformément à l'étude à la loupe, un magma très régulier de tout petits cristaux agglomérés par une gangue calcaire. Ceci explique la grande résistance : 991 ohms.

N° 13. — Galène sensible de la télégraphie militaire (T. M.) (1916). Magma de gros cristaux. Résistance : 106 ohms.

N° 23, n° 24 — Galènes sensibles de la T.M (1919). Magmas de petits cristaux. Le n° 23 présente au spectroscope, de façon irrégulière, les raies du zinc. Résistances : 75 et 71 ohms.

N° 25. — Six échantillons de galènes sensibles de la T. M. (1920) transmis pour études par le général Ferrié. Ces galènes sont analogues aux deux précédentes, mais les cristaux sont plus brillants et plus gros. La composition est assez irrégulière. On voit apparaître parfois les raies du cuivre ou celles du zinc

§ 1. — Contact par pointes

Lien entre les dissymétries et les propriétés détectrices

Afin d'étudier la conductibilité des galènes dans des conditions qui se rapprochent des montages de détecteurs, j'ai adopté le dispositif suivant :

1) *Appareil.* — Un cristal de galène est serré entre deux plaques métalliques, l'une fixe, l'autre mobile. Un potentiomètre permet de lancer à travers cette galène des courants variables ; on vérifie au moyen d'une clé de renversement qu'ils ont même intensité dans les deux sens.

Le quotient de la différence de potentiel qui existe entre les deux plaques par l'intensité donne la résistance de la galène. Pour les divers échantillons étudiés et sous les divers potentiels, cette résistance a subi des variations de 15 à 8.000 ohms. Si on laisse de côté deux cas extrêmes, les résistances s'échelonnent assez régulièrement entre 30 et 100 ohms.

Les différences de potentiel appliquées aux bornes reliées aux deux plaques ne dépassant pas 1,6 volts, les intensités atteignent au maximum 40 milliampères. Ainsi montée, la galène *ne fonctionne nullement comme détecteur*, ainsi qu'on peut s'en assurer au moyen d'un dispositif de récep-

tion qu'on branche sur une antenne accordée pour recevoir les signaux horaires d'Eiffel. Ce résultat confirme les expériences faites sur des lames cristallines serrées entre des plaques métalliques.

2) *Expériences.* — Sur la galène ainsi fixée, on prend contact par deux pointes formant ressort, placées chacune à l'extrémité d'une tige mobile dans toutes les directions, comme en comportent les détecteurs ordinaires. Les deux tiges sont reliées aux bornes d'un galvanomètre à cadre qui permet de connaître la différence de potentiel e entre les deux points de contact avec la galène.

Le plus souvent, lorsqu'on renverse le courant à travers la galène, *e change simplement de sens*, si les deux pointes servant à prendre contact sont identiques. Lorsque les pointes sont de nature différente, ou même parfois quand elles sont semblables, on peut cependant constater des dissymétries qui ne dépassent pas en général $\frac{1}{15}$ de e.

D'ailleurs e n'est que de l'ordre du *millivolt* lorsque la différence de potentiel aux bornes de la galène est de l'ordre du *volt*.

De ces résultats il faut conclure que la chute de potentiel est surtout marquée au contact des plaques métalliques et de la galène, c'est-à-dire que tout se passe comme s'il y avait une *énorme résistance de contact*. La galène ne se comporte nullement comme une masse métallique de résistance égale : la variation du potentiel est discontinue.

3) *Variation du potentiel.* — Ce résultat est confirmé par l'étude qu'on peut faire de la chute de potentiel entre un point très voisin d'une électrode, et un second point qui s'éloigne peu à peu du premier, jusqu'au voisinage de la deuxième électrode.

En général on observe une *chute très brusque* du potentiel dans les deux zones avoisinant de très près les électrodes, surtout lorsque les points de contact des cristaux et des

plaques métalliques ont pu être amenés près de la surface supérieure de la galène. Entre ces deux zones, si le bloc de galène est homogène, le potentiel baisse *régulièrement* et lentement.

La galène n° 13 fournit un exemple très net de cette variation de potentiel. Entre des points voisins des électrodes la chute totale est 0,8 millivolt. Dans chacune des zones voisines d'une électrode elle est de 0,3 millivolt environ ; sur la zone moyenne du cristal le potentiel varie régulièrement de 0,2 millivolt.

Les galènes clivées n^{os} 16, 17, 19 et 20 donnent des résultats analogues, si la face sur laquelle on prend contact ne présente ni failles, ni irrégularités.

Lorsqu'il y a une *faille*, ou une jonction de deux massifs cristallisés, orientée parallèlement aux plaques des électrodes, on observe une chute de potentiel marquée aux deux bords ; les surfaces équipotentielles ont alors des formes très irrégulières, la variation de potentiel étant continue tant qu'on reste sur le même massif cristallin.

C'est ainsi que, pour certaines faces des galènes n^{os} 13, 16 17 et 20, une forte proportion $\left(\frac{3}{5}\right)$ de la chute totale de potentiel est concentrée aux deux bords de la faille. Nous constatons ici l'existence d'une couche de contact à grande résistance, intercalée à la jonction des deux massifs cristallins, comme il s'en trouve une au contact du cristal et des plaques métalliques.

Enfin avec certaines galènes faites de *petits cristaux* bien visibles, la différence de potentiel entre deux points de la surface est à peine sensible, sauf en des points extrêmes très voisins des deux électrodes. Il semble que, dans ce cas, il existe des tubes de courant déterminés par les cristaux, isolés les uns des autres et n'affleurant que rarement à la surface. Les galènes n^{os} 21, 22, 23 présentent cette particularité :

les différences de potentiel ne dépassent pas 0,02 millivolt pour une chute de 1,6 volt aux électrodes.

4) *Dissymétries.* — L'étude des dissymétries permet de serrer de plus près le phénomène propre de la détection.

Soient A et B deux pointes appuyant en des points *a* et *b* de la galène. On renverse la différence de potentiel aux bornes de la galène. Si le phénomène est dissymétrique, le galvanomètre accuse deux déviations inégales. Nous pouvons admettre que l'inégalité tient uniquement à une différence entre les deux séries de résistances de contact :

Pointe A/galène + Galène/Pointe B d'une part,

Pointe B/galène + Galène/Pointe A d'autre part.

Je suppose que la déviation soit plus grande dans le deuxième cas que dans le premier ; le courant est plus intense lorsqu'il *sort* de la galène *par la pointe A*. On a donc, puisque les différences de potentiel entre *a* et *b* sont les mêmes, en valeur absolue, dans les deux cas :

Résistances Pointe B/galène + Galène/Pointe A <
< Résistances Pointe A/galène + Galène/Pointe B.

Des expériences sur lesquelles nous reviendrons plus loin ont montré que si l'on prend contact sur une galène par une pointe et une mâchoire métallique, et qu'on applique aux bornes des différences de potentiel symétriques, le courant est *plus faible* lorsqu'il *entre par la pointe* que lorsqu'il en sort. On sait que les résistances au contact de la galène et d'une plaque ne dépendent pas du sens du courant et sont d'ailleurs très inférieures à celles du contact par pointes. La dissymétrie dans le cas du contact par une pointe et une plaque tient donc de façon prépondérante à la *pointe*, et la résistance dans le sens Pointe/Galène est supérieure à la résistance Galène/Pointe.

Il s'ensuit qu'on a, dans l'expérience qui nous occupe :

Résist. Pointe B/Galène — Résist. Galène/Pointe B <
< Résist. Pointe A/Galène — Résist. Galène/Pointe A.

Mais une pointe est d'autant meilleure pour la détection que la différence des résistances au contact, dans les deux sens, est plus grande.

Si donc le courant sortant par la *pointe A est le plas fort*, c'est que le contact de la *pointe A avec la galène est meilleur pour la détection* que le contact de la pointe B.

On peut essayer ainsi, *à priori*, une classification de la valeur détectrice des pointes, en cherchant le sens des dissymétries dans les déviations. Les expériences ont été faites avec les galènes nos 12 et 13 et les galènes clivées nos 16, 17 et 19. Les résultats obtenus sont les suivants :

Certains points des galènes peuvent donner lieu à de petites dissymétries, même si les pointes métalliques assurant les contacts sont identiques. Dans ce cas, évidemment, l'un des points touchés est plus sensible que l'autre.

Avec des pointes de nature différente, on constate des dissymétries ne dépassant pas $\frac{1}{4}$ du phénomène. La nature du métal constitutif ne semble pas influer beaucoup plus sur ces dissymétries que la forme de la pointe et le choix des points de contact.

Cependant on peut classer les pointes utilisées comme il suit :

La meilleure pour la détection est une fine pointe de maillechort blanc ; puis viennent une pointe coupée dans un fil d'acier de 0,4 mm. de diamètre, une pointe de laiton de 0,5 mm. de diamètre, et enfin, à égalité, deux pointes coupées dans des fils de 0,3 mm. de diamètre, l'une en platine, l'autre en un laiton spécial.

5) *Détection.* — Le dispositif réalisé dans ces expériences permet une vérification directe du raisonnement fait *à priori* sur les meilleures conditions de fonctionnement d'un contact pour la détection. J'ai indiqué au début ce raisonnement qui justifie l'importance donnée à l'étude des galènes en courant continu.

Supposons que deux pointes établissent sur une galène un contact dissymétrique ; le cristal ainsi monté doit fonctionner comme détecteur bien que les conditions d'installation soient foncièrement différentes de celles des détecteurs ordinaires. J'ai vérifié l'exactitude de ces prévisions, en particulier avec une galène clivée n° 19 qui présente une régularité remarquable dans la répartition du courant.

Deux pointes, l'une en laiton, l'autre en acier, prennent contact en des points tels que la dissymétrie soit environ $\frac{1}{4}$ du phénomène total. Les bornes reliées à ces deux pointes sont utilisées comme des bornes de détecteur, les plaques métalliques ne servant plus qu'à immobiliser le cristal.

Un poste récepteur des transmissions d'Eiffel étant installé avec circuit de réception, détecteur à cristal, et amplificateur à trois lampes (1), on substitue au cours de la réception la galène n° 19 au détecteur. Dans les conditions de dissymétrie qui viennent d'être indiquées, *il y a détection*. A la vérité le phénomène reste faible, et l'intensité du son est du même ordre que celle qu'on obtiendrait, sans amplification, avec un bon détecteur à galène ; mais nous verrons plus loin que la dissymétrie est bien plus marquée lorsque la galène est dans une monture de détecteur.

Si les contacts pris sur le cristal sont symétriques et, en particulier, si les deux pointes appuient sur les plaques métalliques de serrage de la galène, on n'entend plus aucun son.

Enfin si l'on branche en dérivation le détecteur ordinaire et la galène montée entre deux pointes, les effets peuvent concorder ou se retrancher suivant que la pointe du détecteur est reliée ou non à celle des deux pointes qui fonctionne le mieux pour la détection.

Une autre série d'expériences du même ordre a été faite

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 157.

au moyen d'un petit poste d'émission constitué par un buzzer étalonné. La galène montée entre deux pointes sert de détecteur dans le circuit de réception. Dans ces conditions on entend nettement les signaux émis par le buzzer avec deux points de contact pour lesquels on vérifie ensuite que la dissymétrie est $\frac{3}{13}$. Au contraire on n'entend rien lorsque les contacts sont symétriques.

Donc nous sommes fondés à dire que *le fonctionnement d'une galène comme détecteur* est conditionné par la *dissymétrie* des courants obtenus lorsqu'on applique aux bornes des différences de potentiel symétriques, quels que soient d'ailleurs la nature des contacts et le mode d'obtention de cette dissymétrie.

§ 2. — Caractéristiques de détecteurs à galène.

Pour achever l'étude des galènes en courant continu, prenons maintenant un cristal fixé dans une monture de détecteur. L'un des contacts est constitué par une pointe métallique, extrémité d'un petit ressort spécial qu'on peut appuyer plus ou moins fort en des points variables du cristal. L'autre est fait de pièces de cuivre mobiles, qui assurent un grand nombre de points de contact avec la galène. Le but est d'établir des *caractéristiques* analogues à celles des lampes à 3 électrodes [1], c'est-à-dire des courbes de variation de l'intensité du courant qui traverse le cristal en fonction de la différence de potentiel aux bornes. D'ailleurs si l'on veut rester dans les limites des phénomènes qui ne détruisent pas la sensibilité, il ne faut pas dépasser 2 ou 3 volts pour cette différence de potentiel. Au delà le détecteur cesse d'avoir un bon fonctionnement.

1) *Voltages inférieurs à 2 volts.* — Un dispositif de potentiomètre, constitué par une résistance de 160 ohms sur

[1] V. Rothé, *op. cit.*, p. 121.

laquelle un curseur mobile prend contact, permet d'appliquer aux bornes de la galène une différence de potentiel variable. On peut en changer le sens au moyen d'une clé de renversement. Un galvanomètre à cadre donne l'intensité du courant à travers la galène, à raison de 0,37 microampère par millimètre de déviation du spot. Pour les intensités plus grandes on utilise un ampèremètre.

En fonction de l'intensité mesurée, i ampère, toutes les résistances, excepté celle de la galène, étant connues, ainsi que la f. é. m. E des accumulateurs, il est aisé de calculer la différence de potentiel e aux bornes de la galène. Elle est donnée en volts par :

$$e = \mathrm{E}\,\frac{\mathrm{R}'}{\mathrm{R}} - i\left(r + (\mathrm{R} - \mathrm{R}')\,\frac{\mathrm{R}'}{\mathrm{R}}\right)$$

en désignant respectivement par r, R et R', les résistances en ohms, de l'ampèremètre, du rhéostat servant de potentiomètre, et de la portion de ce rhéostat intercalée dans le circuit de la galène.

A priori il semblait nécessaire de modifier dans de larges mesures les conditions d'installation de la galène. Mais les expériences faites précédemment nous permettent d'affirmer que la mâchoire enserrant le cristal par des vis a peu d'action, et que c'est au contact de la pointe que se passent les phénomènes prépondérants.

Des essais préalables ont montré que la *nature de cette pointe* (métal constituant et dimensions, entre certaines limites), de même que la *pression* avec laquelle la pointe appuie sur le cristal n'ont pas d'action bien marquée. En effet, il peut y avoir plus de différence entre les caractéristiques obtenues, toutes choses égales d'ailleurs, pour deux points différents de la surface d'une même galène, qu'entre certaines des caractéristiques fournies par des pointes différentes. Les écarts portent d'ailleurs uniquement sur des valeurs numériques absolues, et non sur le sens des phénomènes.

De même un dispositif de ressort spécial dont on mesure l'aplatissement au moyen d'une réglette à vernier, permettait de connaître la force pressante exercée par le ressort sur la galène. Des essais préliminaires ayant montré que cette pression ne changeait rien à l'allure des résultats, ce dispositif n'a pas été utilisé pour les mesures définitives.

On s'est donc borné à monter les galènes dans divers détecteurs en utilisant des pointes soit de platine, soit de maillechort, soit de laiton

Une vingtaine de caractéristiques ont été établies avec les galènes clivées (16, 17, 19 et 20), les galènes en magmas cristallins (13, 15, 22), les galènes de la T. M. et les cristaux sensibilisés.

Pour chaque point un vibrateur ou un buzzer permettaient le contrôle de la sensibilité.

Les résultats sont les suivants :

Les *galènes non sensibles*, ou les points non sensibles des galènes paraissant médiocres pour la réception (nos 19 et 20) donnent des caractéristiques *symétriques* par rapport à l'origine et parfois assez *voisines de droites*. Ces cristaux s'écartent donc peu de la loi d'Ohm, et il n'y a pas lieu de s'étonner de leur absence de propriétés détectrices.

Au contraire, en des points quelconques de *galènes sensibles*, on obtient des *caractéristiques dissymétriques par rapport à l'origine*. C'est là le fait essentiel propre aux galènes détectrices.

Je reproduis ici certaines de ces courbes (fig. 3).

Quelles que soient la galène et la pointe utilisées, dans les conditions où nous nous plaçons (intensités inférieures à 5 milliampères, voltages inférieurs à 2 volts), *la dissymétrie est de sens constant*. Tout se passe comme si *la résistance était plus grande lorsque la pointe est positive*, c'est-à-dire lorsque le courant entre dans la galène par la pointe, que lorsqu'il en sort.

C'est à la *pointe* que nous rapportons le rôle prépondérant

dans la dissymétrie observée, parce que nous avons vu que les résistances au contact d'une large plaque et d'une galène sont très inférieures et présentent une constance bien plus grande.

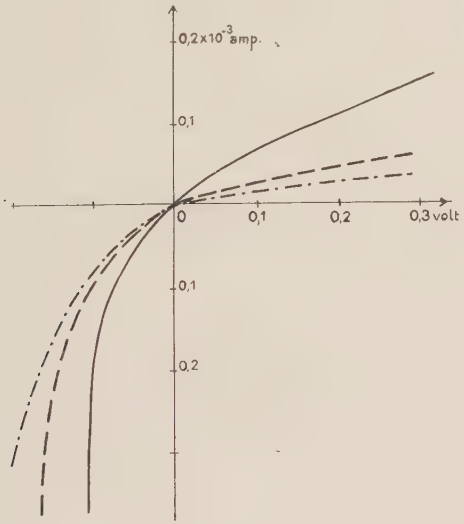

Figure 3.

Si l'on trace les courbes $\frac{i}{e}$ en fonction de e, la courbe relative à la pointe positive est toujours *au-dessous* de la courbe relative à la pointe négative (fig. 4).

Le *coude* des courbes se produit *à l'origine* ou à son voisinage immédiat. Cependant, aux très petites valeurs de la différence de potentiel, la dissymétrie est souvent plus faible et ne devient notable qu'à partir de 0,05 ou même de 0,1 volt.

Les courbes de $\frac{i}{e}$ le montrent ; les branches relatives aux deux sens du courant, d'abord peu éloignées, vont en s'écartant rapidement quand le potentiel croît jusqu'à 0,4 volt. Du

reste, dans les limites de voltage indiquées, de 0 à 2 volts, la résistance pour la pointe positive est presque constante, et la branche de caractéristique correspondante est presque une droite. Au contraire, dans le cas où la pointe est négative, $\frac{i}{e}$ croît nettement et la résistance décroît lorsque e gran-

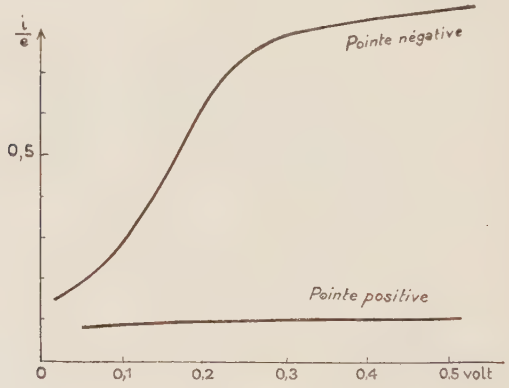

Figure 4.

dit ; la branche correspondante de la caractéristique est voisine d'un arc de parabole :

$$i = ae^2 + be.$$

Puis quand le voltage atteint 0,5 volt, la variation de résistance diminue beaucoup, la courbe $\frac{i}{e}$ présente un palier se traduisant sur la caractéristique par une zone presque rectiligne qui dure jusque vers 2 ou 3 volts.

En tout cas le raccord des deux branches de caractéristique se fait toujours à l'origine et avec deux tangentes différentes. Les lois des phénomènes pour la pointe positive et pour la pointe négative sont distinctes dès le début, la divergence s'accentuant jusqu'à 0,3 volt environ. Cette divergence est d'autant plus marquée que le point est plus sensible. On obtient même dans certains cas un effet de

« soupape » presque complet, des différences de potentiel alternées allant jusqu'à 0,6 volt donnant dans un sens un courant de 1 milliampère, et dans l'autre de 0,015 milliampère (galène n°13).

Naturellement les galènes détectrices, dont les caractéristiques sont dissymétriques par rapport à l'origine, s'emploient sans f. é. m. auxiliaire.

Donc deux points sont clairement acquis :

1° La détection est un *phénomène de contact* n'intéressant que dans une faible mesure la masse du cristal ;

2° Elle est liée à une *dissymétrie* des caractéristiques par rapport à l'origine, dissymétrie qui traduit celle des contacts sur la galène.

Peut-on interpréter par une hypothèse plausible soit cette conductibilité unipolaire, soit les écarts à la loi d'Ohm que présentaient déjà les lames cristallines à conductibilité symétrique? Nous n'en savons rien pour l'instant ; cependant nous pouvons là encore écarter l'hypothèse d'une f. é. m. de polarisation analogue à celle qui existe dans les détecteurs électrolytiques.

Déjà par voie indirecte nous pouvons nous assurer qu'il n'y a pas de polarisation sensible. En effet, si c'était le cas, la nature du métal constituant la pointe aurait une action marquée sur la forme des caractéristiques. Or il n'en est rien. Là comme précédemment la nature du métal a peu d'importance. Si, avec le montage en détecteur, nous essayons sur une galène donnée d'établir au hasard un même nombre de caractéristiques avec pointe de platine d'abord, et ensuite avec pointe de maillechort, nous obtenons deux faisceaux de courbes de répartition quelconque.

Des mesures directes conduisent à la même conclusion : la polarisation électrolytique, si elle existe, n'a pas de rôle prépondérant. En effet, pour justifier la dissymétrie des caractéristiques, il faudrait, sous une intensité de 0,1 milliampère, invoquer des forces électromotrices atteignant

0,45 volt. Or, si l'on branche une galène sensible aux bornes d'un galvanomètre susceptible de déceler 0,5 millivolt, on n'obtient aucune déviation.

Voici une méthode plus sensible encore qui permet d'affirmer qu'aucune f. é. m. n'est mise en jeu au contact de la pointe métallique et de la galène. On intercale le cristal sensible dans un circuit comprenant une bobine de self et un condensateur variable. Cette bobine est couplée avec un second enroulement branché aux bornes d'un amplificateur basse fréquence [1] pourvu d'un téléphone. On n'entend rien lorsque le contact de la pointe et de la galène est rompu ou rétabli ; or ce dispositif permet de déceler des f. é. m. très faibles et peu durables.

Ces expériences négatives confirment celles qui ont été signalées au chapitre précédent.

2) *Voltages supérieurs à 2 volts.* — Si l'on s'écarte des conditions d'emploi des galènes comme détecteurs, en appliquant aux bornes des voltages croissants, les phénomènes se modifient profondément.

La branche de la caractéristique relative à la pointe positive, d'abord rectiligne, se redresse peu à peu et devient, sous 5 à 6 volts, symétrique de la branche négative (fig. 5). Corrélativement les courbes de $\frac{i}{e}$ relatives à la pointe positive et à la pointe négative se rejoignent.

Au delà ces courbes ne restent pas confondues ; la caractéristique manifeste une *dissymétrie de sens inverse* de celle qu'on avait aux faibles énergies ; cette dissymétrie ne dépasse pas $\frac{1}{10}$ du phénomène.

Du reste, les mesures précises et comparables entre elles deviennent rapidement impossibles. A partir de 7 à 8 volts le passage du courant, même pendant un temps très court,

[1] V. Rothé, *op. cit.*, p. 157.

provoque des phénomènes irréversibles comparables à ceux de l'arc électrique. La galène fond, se creuse en cratère, surtout si le courant entre par la pointe. Elle se décompose parfois ; la résistance tombe au dixième de sa valeur, la pointe adhère au cristal et le contact primitif est détruit. Il y a dans ce cas formation de « ponts » conducteurs, et « cohération » au sens où Lodge l'entendait. Devant ces phénomènes, la comparaison qui se présente tout naturellement à l'esprit est celle d'un condensateur trop mince crevé par un potentiel explosif.

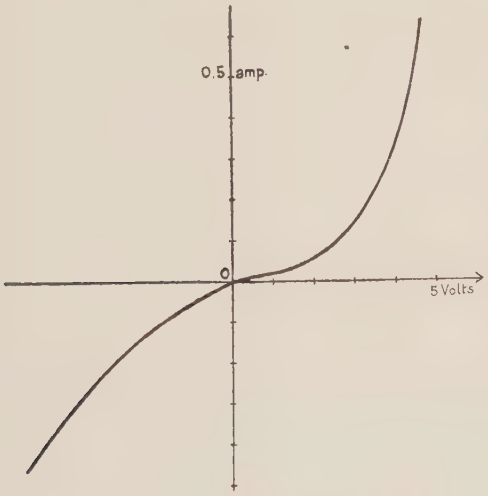

Figure 5.

Dans tout le cours de l'étude des galènes sensibles, nous retrouverons ce renversement du sens de la rectification, et cette limitation aux conditions de bon fonctionnement des détecteurs à cristaux.

§ III. — Phénomènes d'induction.

Par induction on peut aussi lancer dans un circuit comprenant une galène et un galvanomètre, un courant instantané de sens variable et de faible énergie. On se rapproche alors des conditions d'emploi d'un détecteur. Les expériences ont été faites sur les galènes naturelles clivées, les magmas cristallins sensibles et les galènes sensibilisées artificiellement. Les résultats confirment ceux qu'on a obtenus précédemment.

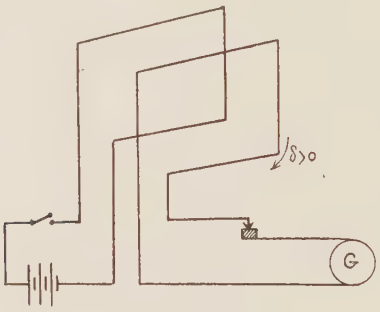

Figure 6.

Le montage est indiqué par la figure ci-contre (fig. 6). Les selfs couplées sont constituées par deux enroulements plats, identiques, portés par deux plateaux carrés de 20 cm. de côté, dont la distance peut varier. Le circuit inducteur comprend une batterie de 6 ou 8 volts, un des enroulements et un interrupteur; on n'utilise que l'induction à la rupture, la clé qui sera décrite plus loin permettant de reproduire cette rupture dans les mêmes conditions. Le circuit induit comprend le second enroulement, la galène, et un galvanomètre à cadre de faible résistance (Ayrton-Mather).

Au préalable on a mesuré l'énergie du phénomène induit en fonction de la distance des plateaux, en substituant au détecteur et au galvanomètre un thermogalvanomètre Dud-

dell. La courbe des déviations du thermogalvanomètre est du reste très analogue à celle que donne le galvanomètre en l'absence de la galène. La différence essentielle consiste en ce que les déviations du galvanomètre changent de sens lorsqu'on renverse le courant dans le circuit inducteur.

Si l'on intercale dans le circuit induit une galène non sensible, ou une résistance dépourvue de self, les déviations au galvanomètre diminuent mais demeurent symétriques quand on change le sens du courant inducteur.

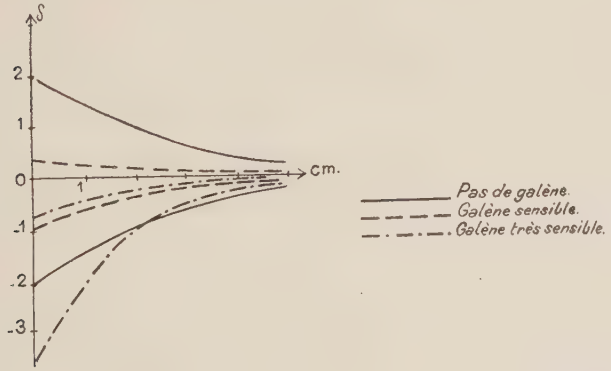

Figure 7.

Si l'on prend, au contraire, une galène montée en un point *sensible*, le phénomène est tout différent : les déviations dues au phénomène induit lors de la rupture du courant primaire *ne sont plus symétriques* quand on renverse le courant. En des points de sensibilité moyenne, on obtient des déviations de sens contraire et de grandeur différente. Si le point est très sensible, la galène fonctionne en soupape ; le phénomène induit ne provoque de déviation que dans un sens. Enfin, en des points d'une sensibilité extrême, quel que soit le sens du courant primaire, on obtient à la rupture des déviations toujours de même sens. La galène est alors un véritable redresseur de courant. Pareil phénomène n'a pas été

constaté dans l'étude des caractéristiques. Il ne faut pas nous en étonner car l'énergie mise en jeu ici est toujours inférieure à 0,9 microjoule, ce qui correspondrait, en courant continu, à des intensités trop faibles, ou à des durées trop courtes pour que les mesures soient aisées.

Le graphique ci-contre (fig. 7), donne, en fonction de la distance des enroulements mesurée en centimètres, les déviations au galvanomètre. Une des courbes est obtenue en l'absence de galène, les deux autres avec des cristaux de sensibilité différente.

La dissymétrie que traduisent les courbes correspond, comme dans le cas précédent, à une résistance plus grande pour le courant qui traverse le contact de la pointe au cristal (sens positif des déviations).

Remarques. — Au cours des expériences précédentes nous avons eu constamment à contrôler la sensibilité des points étudiés. De façon générale nous observons les faits suivants :

1° Les points les plus sensibles d'un cristal se présentent, non sur les faces de clivage polies, mais près des arêtes ou des fissures. Du reste les échantillons de galène de la T. M. sont faits de très petits cristaux et non de blocs bien clivés.

2° Comme on l'a constaté bien des fois, un point faiblement sensible peut se *sensibiliser* par le passage prolongé d'ondes amorties provenant d'un buzzer. Cette propriété, que nous retrouverons dans toutes les expériences ultérieures, éveille une comparaison entre l'absence de sensibilité et une espèce d'inertie du cristal, que des ondes prolongées parviendraient à vaincre.

3° Inversement un point sensible peut se *désensibiliser* si un courant continu trop intense le traverse. Par exemple avec la galène n° 25, nous observons les faits suivants : un voltage de 1,7 volt est appliqué aux bornes ; le rapport des

intensités dans les deux sens est 48 ; la résistance minima 126 ohms ; le point reste très sensible.

On applique ensuite 4 volts aux bornes ; le rapport des intensités dans les deux sens est 50 ; la résistance minima tombe à 16 ohms ; le point reste sensible.

Le voltage aux bornes monte à 6 volts ; la résistance minima devient 7 ohms, le rapport des intensités tombe à 14 et le point n'est presque plus sensible.

Enfin, si la différence de potentiel est portée à 10 volts, on voit l'aiguille de l'ampèremètre procéder par secousses, la résistance minima est alors de 2 ohms et le rapport des intensités est 3. Mais l'expérience ne peut être prolongée car la pointe métallique rougit ainsi que la zone du cristal en contact. D'ailleurs toute sensibilité disparaît.

Au cours des orages on sait qu'il se produit des altérations analogues dans les détecteurs à galènes. Tous ces phénomènes confirment ce qui a été dit sur l'importance des contacts dans la détection.

Conclusions. — Quel que soit le montage d'une galène traversée par un courant continu, ce cristal *ne suit pas la loi d'Ohm*, la courbe caractéristique n'est pas une droite. D'ailleurs la valeur de la résistance et les variations dont elle est susceptible dépendent essentiellement des conditions de contact. On ne peut attribuer ces variations à une polarisation électrolytique.

Dans certaines conditions, la conductibilité de la galène peut devenir nettement *unipolaire* aux *faibles énergies*. Cette unipolarité se produit lorsque les contacts sont différents soit quant aux électrodes, soit quant aux points intéressés ; elle est rendue possible justement par ce fait que les cristaux ne suivent pas la loi d'Ohm et que les variations de résistance sont un phénomène de contact.

La dissymétrie se manifeste en courant continu par des différences entre les intensités que des forces électromotrices opposées créent à travers le cristal. Dans certains cas la

galène peut fonctionner en soupape, voire même en redresseur. La caractéristique présente toujours une *dissymétrie* par rapport à l'origine qu'on peut interpréter en admettant qu'il se superpose deux phénomènes, dont l'un change simplement de sens quand on renverse la différence de potentiel aux bornes, tandis que l'autre correspond toujours à un *afflux positif du cristal vers la pointe*. C'est ce phénomène de sens constant qui détermine la dissymétrie des caractéristiques.

Cette dissymétrie permet de prévoir les propriétés détectrices du cristal considéré, et l'expérience justifie pleinement ces prévisions, les galènes détectant d'autant mieux que la dissymétrie est plus accusée.

Aux *fortes intensités* toutes les galènes présentent au contraire une *légère dissymétrie de sens inverse*, qui n'a d'ailleurs pas d'application en T. S. F.

CHAPITRE III

ÉTUDE DES GALÈNES EN COURANT ALTERNATIF DE BASSE ET DE HAUTE FRÉQUENCE

§ 1. — Courant alternatif

J'utilise le courant du secteur, courant à 120 volts et 50 périodes. Pour réduire l'intensité à travers la galène j'emploie tantôt le montage en *dérivation*, tantôt le montage en *série*. Dans le premier cas le courant traverse des rhéostats, un ampèremètre thermique et un manipulateur. Un de ces rhéostats forme potentiomètre, et l'on peut brancher sur une fraction variable de sa résistance un deuxième circuit comprenant un inverseur de courant, la galène et un ampèremètre. Dans ces conditions, si le contact au niveau du détecteur est rompu, la différence de potentiel entre la pointe et le cristal n'est qu'une fraction de 120 volts.

Dans le montage en série, au contraire, le courant du secteur traverse successivement des rhéostats, un manipulateur, la galène et les ampèremètres. La différence de potentiel, en circuit ouvert, au niveau du détecteur, est alors de 120 volts.

Ces deux dispositifs ont donné, pour une même intensité efficace, des *courants rectifiés très différents.*

Sous 120 milliampères efficaces, par exemple, le courant rectifié passe de 6 à 1,3 milliampères lorsque la différence de potentiel en circuit ouvert croît de 30 à 120 volts. Avec un autre échantillon de galène, l'intensité efficace étant 46 milliampères, le courant rectifié passe dans les mêmes conditions de 7,2 à 0,9 milliampères.

J'insiste sur ce fait que nous rencontrons ici pour la première fois, car il fournit une condition essentielle du bon fonctionnement des galènes : quelle que soit l'intensité du courant et par suite son énergie, la rectification ne se produit dans de bonnes conditions que si le potentiel, en circuit ouvert, demeure inférieur à une limite donnée. L'étude des courants rectifiés nous amènera, dans tous les cas, à des conclusions analogues. Du reste les modifications que présentaient les caractéristiques aux potentiels supérieurs à 6 volts pouvaient déjà nous faire prévoir pareils résultats.

Je n'ai trouvé trace de cette particularité de la rectification par les galènes dans aucun travail antérieur, sauf peut-être, de manière bien vague, chez Flowers, qui écrit en 1914 : « le pourcentage du courant rectifié diminue, si les résistances mises en série croissent ». Si l'on suppose, ce qui n'est pas spécifié, que l'intensité efficace reste la même, l'addition de résistances en série a pour effet d'accroître le potentiel en circuit ouvert:

1) Montage en dérivation. — Le dispositif a été décrit plus haut. On vérifie tout d'abord que l'ampèremètre n'accuse aucune déviation si la pointe du détecteur, soigneusement nettoyée, appuie sur une plaque de métal. Dans ce cas il n'y a pas de rectification.

Les galènes argentifères ou pures, non sensibles, ne donnent pas non plus de courant rectifié, sauf cependant la galène pure n° 5 qui, pour certains points, livre un courant continu, inférieur à 1 milliampère, et correspondant à un afflux négatif du cristal à la pointe.

Toutes les galènes sensibles, naturelles ou non, transforment au contraire le courant alternatif en un courant continu correspondant à un *afflux positif du cristal à la pointe*. Ce résultat est conforme aux conclusions de l'étude des caractéristiques.

En valeur absolue, ce courant rectifié varie beaucoup suivant les galènes et suivant la sensibilité des points touchés. Il peut même s'annuler en certains points des galènes clivées qui sont des cristaux médiocres pour la détection.

Pour un voltage efficace de 0,2 volt, par exemple, les intensités rectifiées peuvent varier, suivant les cristaux et les points, de 0 à 15 milliampères.

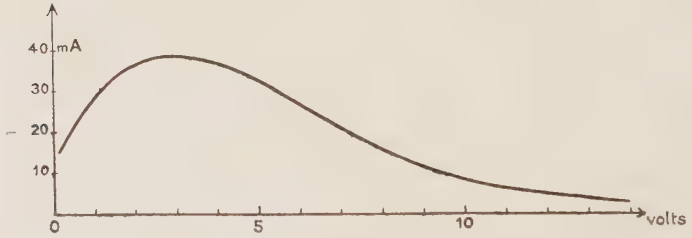

Figure 8.

Si l'on fait croître, pour un même point, la différence de potentiel efficace en circuit fermé, c'est-à-dire si l'on déplace le curseur sur le rhéostat potentiomètre, l'intensité efficace croît et *l'intensité rectifiée passe par un maximum* pour une différence de potentiel toujours inférieure à 5 volts. Au delà elle décroît peu à peu et devient pratiquement nulle quand le voltage efficace atteint 10 à 12 volts, l'intensité efficace étant de 280 à 300 milliampères.

La courbe ci-contre (fig. 8) donne les intensités rectifiées en milliampères en fonction des voltages efficaces exprimés en volts, pour un point très sensible de la galène n° 22. Le maximum est atteint sous 3 volts. L'étude des caractéristiques permettrait du reste de prévoir l'existence de ce maximum.

2) *Montage en série.* — Une galène sensible traversée directement par le courant alternatif, dont des rhéostats en

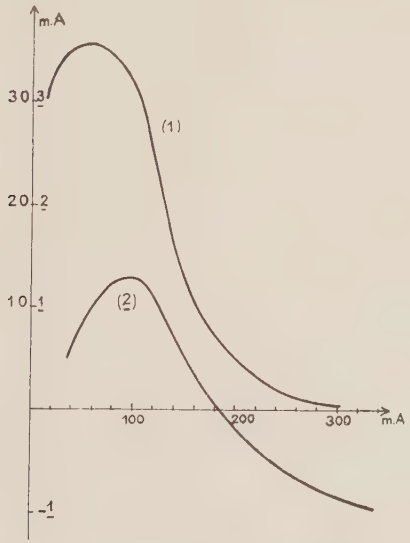

Figure 9.

série réduisent l'intensité, donne, si l'intensité efficace est petite, un courant rectifié de même sens que le courant obtenu avec le montage en dérivation, mais beaucoup plus faible pour une même intensité efficace. D'ailleurs, l'aiguille de l'ampèremètre vibre, ce qui dénote une mauvaise rectification.

Si l'on fait croître l'intensité efficace en réduisant les rhéostats mis en série, ce faible courant rectifié décroît, puis

change de sens, résultat que l'étude faite en courant continu nous faisait prévoir.

Avec les galènes non sensibles on n'obtient que ce second courant, qui correspond à un afflux négatif du cristal à la pointe. Il en est de même avec les points non sensibles de certaines galènes médiocres (galènes clivées).

Les courbes ci-contre (fig. 9), établies pour un même point très sensible de la galène 22 donnent, en fonction de l'intensité efficace, les intensités rectifiées dans le montage en dérivation (courbe (1)) et dans le montage en série (courbe (2)). Pour cette seconde courbe l'unité d'ordonnée est dix fois plus grande que pour la première. Les intensités sont mesurées en milliampères.

Oscillographe Blondel. — Un oscillographe bifilaire Blondel, à 3 équipages, a permis de contrôler les résultats précédents fournis par les ampèremètres qui ne donnent que des valeurs moyennes des courants. Les expériences ont été faites à l'Institut électrotechnique de Nancy, au laboratoire de M. le professeur Mauduit.

Dans une première série d'expériences, on utilise une source de courant alternatif à 120 volts et 47 périodes. Le courant traverse un rhéostat de 8.000 ohms, la galène, et un équipage de l'oscillographe. Dans ces conditions l'introduction de la galène modifie à peine la courbe fournie par l'oscillographe. Les deux concamérations de la courbe sont presque identiques : l'une correspond à 20 milliampères au maximum, l'autre à 19. La rectification est donc mauvaise bien que l'intensité efficace soit faible, parce que la différence de potentiel en circuit ouvert est de 120 volts.

Au moyen d'un transformateur, on réalise une seconde source de courant à 47 périodes, sous 2,4 volts. Cette fois la galène fonctionne en soupape : une des deux concamérations est réduite au point que son maximum atteint à peine 0,4 milliampère, tandis que l'autre dépasse 40 milliampères. D'ail-

leurs le courant rectifié correspond toujours à un afflux positif du cristal à la pointe.

Pour photographier les résultats il faut, l'amplitude étant trop grande, mettre une résistance en série et modifier un peu le transformateur. La rectification est alors un peu moins parfaite : une des élongations maxima correspond à 35,7 milliampères et l'autre à 3,5. La figure ci-contre (fig. 10) reproduit une portion de l'oscillogramme obtenu.

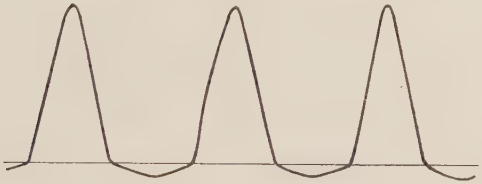

Figure 10.

En résumé nous avons constaté que les galènes sensibles rectifient le courant alternatif dans le sens que les caractéristiques permettaient de prévoir. Aux faibles intensités et sous de faibles potentiels la véritable rectification se traduit par un afflux positif du cristal à la pointe. Au contraire il se produit aux fortes intensités une rectification assez mauvaise, de sens inverse, et qui n'est plus caractéristique des galènes sensibles.

De plus, l'étude en courant alternatif montre que, même pour de faibles intensités, les galènes sensibles ne rectifient convenablement que si la différence de potentiel en circuit ouvert ne dépasse pas 40 à 50 volts. L'accroissement de cette différence de potentiel réduit progressivement les propriétés rectifiantes.

§ 2. — Ondes entretenues

1) *Intensités moyennes.* — L'appareil utilisé comme générateur d'ondes entretenues est une hétérodyne à une lampe

où l'entretien des ondes est produit par un couplage en dérivation (1). Sur le trajet de la bobine de self on intercale un enroulement en forme de plateau. Le circuit induit est branché sur un second enroulement identique au premier et couplé avec lui ; un condensateur variable permet d'accorder ce circuit de réception, qui ne diffère d'un circuit oscillant ordinaire que par la présence d'un interrupteur et la substitution d'un galvanomètre au téléphone (fig. 11).

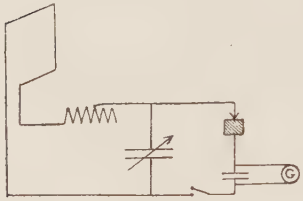

Figure 11.

La longueur d'onde est voisine de 750 mètres. La période du galvanomètre dépasse 1 seconde. Si l'on établit au manipulateur des contacts de $\frac{1}{10}$ de seconde, il passe déjà 40.000 ondes ; c'est donc toujours l'état de régime que nous constatons au galvanomètre.

Deux séries d'expériences ont été faites sur les mêmes galènes, à deux ans d'intervalle, avec des longueurs d'ondes et des circuits inducteurs et induits assez différents. Les résultats sont tout à fait concordants ; nous indiquons ceux de la deuxième série.

A titre de contrôle, on vérifie tout d'abord que le galvanomètre n'accuse aucune déviation quand la pointe du détecteur appuie sur une plaque métallique.

Avec les galènes argentifères et les galènes non sensibles, on obtient un courant rectifié dont l'intensité ne dépasse pas 0,5 microampère sauf en certains points de la galène n° 9, cristal de surface malpropre et altérée. Ce courant traverse le contact de la pointe au cristal. La galène n° 5 donne, en des

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 189 et p. 199, fig. 97.

points sensibles, des courants de sens inverse atteignant 12,5 microampères.

Les autres galènes, dont presque toute la surface est sensible, livrent un courant rectifié correspondant à un *afflux positif du cristal à la pointe*. L'intensité de ce courant dépend essentiellement du point étudié et de la galène. Elle ne dépasse pas 9 microampères avec les cristaux clivés et la galène du Maroc, très résistante. Les galènes artificielles et les galènes faites de petits cristaux donnent des courants rectifiés qui atteignent 80 microampères pour le n° 13, 130 pour le n° 12, 145 pour les n^{os} 15, 23 et 25, et 185 microampères pour le n° 22. Avec ces derniers échantillons les courants ne sont jamais inférieurs à 60 microampères, tous les points étant sensibles.

Dans ces diverses expériences, l'intensité efficace du courant de haute fréquence est maintenue constante. Toutes choses égales d'ailleurs, le courant rectifié varie de 1 à 150 suivant les galènes et de 1 à 10 pour les divers points d'une même galène.

Il y a donc, tant pour les galènes sensibles que pour les autres, un accord remarquable entre les phénomènes observés avec les ondes entretenues et avec les courants alternatifs de faible intensité. Bien que les périodes varient dans le rapport de 8.000 à 1 lorsqu'on passe du courant alternatif aux ondes, la rectification, pour les points sensibles, correspond toujours à un afflux positif du cristal à la pointe. L'ordre de grandeur des courants rectifiés est environ le même dans les deux cas : ils étaient au maximum de 35 milliampères avec l'alternatif; ils ne dépassent pas 0,2 milliampère avec les ondes.

D'ailleurs si les oscillogrammes permettent d'affirmer que la galène rectifie chaque demi-période du courant alternatif, rien ne prouve qu'elle ait le temps de rectifier chaque onde. Nous verrons même plus loin qu'on peut mettre en évidence une certaine inertie électrique des cristaux détecteurs. Du

reste le galvanomètre, comme le téléphone, n'est sensible qu'à l'action globale résultant d'un train ou d'un régime continu d'ondes, et cet effet de somme a le même sens que l'effet du courant alternatif.

2) Grandes intensités. – Aux grandes intensités l'analogie se poursuit entre les ondes entretenues et le courant alternatif. Prenons un poste d'émission à cinq lampes montées en parallèle, « poste omnibus » établi par M. Rothé (1). Le circuit oscillant de réception, identique à celui qui a été décrit plus haut, est branché aux bornes de la bobine du secondaire. On règle l'accord pour une valeur moyenne de l'induction mutuelle.

Si le couplage des deux bobines de self est très lâche, l'ampèremètre du circuit de la galène n'indique un courant rectifié que pour les cristaux très sensibles. Ce courant correspond toujours à un afflux positif du cristal à la pointe. Il atteint 8 milliampères en certains points des meilleures galènes. Avec les cristaux clivés, l'ampèremètre substitué au galvanomètre permet à peine de déceler un courant rectifié.

L'intensité efficace des ondes dans le circuit induit est inférieur, dans ce cas, à 0,1 ampère.

Si le couplage devient plus serré, cette intensité efficace croît jusqu'à 0,6 ampère. On voit alors le courant rectifié diminuer, s'annuler, puis *changer de sens*, au moins pour les cristaux qui ne sont pas trop résistants. C'est le cas pour les galènes clivées et les cristaux nos 13, 15, 22, 25. Ce nouveau courant rectifié correspond donc à un afflux négatif du cristal à la pointe. Il est en relation étroite avec l'énergie des ondes induites ; d'ailleurs il ne dépasse pas 3 milliampères dans les conditions les plus favorables. Pour les galènes clivées il reste très inférieur, nous en verrons plus loin la raison.

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 201, fig. 104 et 105.

Ici encore nous retrouvons, malgré la différence des périodes, une analogie complète avec le courant alternatif.

Inertie. — De plus les ondes vont nous permettre de manifester l'inertie électrique de la galène dont nous avons déjà parlé.

Il est possible en effet de faire émettre à un même poste deux ou trois séries d'ondes de fréquences nettement différentes. Dans les expériences faites, les longueurs d'ondes varient de 200 à 420 mètres. Le réglage est assuré de façon à ce que l'intensité efficace dans le circuit induit soit toujours la même.

Aux faibles intensités, pour lesquelles il y a rectification véritable par les seules galènes sensibles, on constate que *l'accroissement de la longueur d'onde produit le même effet qu'un accroissement d'énergie à fréquence constante.*

En choisissant convenablement la position des enroulements d'induction, on peut provoquer le changement de sens de la rectification par simple variation de la fréquence, l'intensité efficace restant la même.

Donc la rectification véritable se produit d'autant mieux que les ondes sont plus lentes et laissent mieux à la galène le temps de les suivre.

Condensateur microphone. — Comme on l'a vu au galvanomètre, la galène ne rectifie que des courants peu intenses et de faible voltage. Au téléphone, dans les réceptions de T. S. F., les mêmes propriétés se manifestent et l'emploi du condensateur microphone permet de les mettre en évidence de manière indéniable.

Rappelons que les condensateurs microphones (inventés au cours de la guerre par M. Rothé, alors sous-lieutenant au 8e génie), ont deux armatures, dont l'une est constituée par un grillage en cuivre tendu sur cadre de 60 sur 80 cm., et l'autre par une feuille d'aluminium mince collée sur du papier tendu sur un second cadre. Des vis permettent de rapprocher ces armatures suffisamment pour que des vibrations

sonores fassent varier la capacité de façon marquée. On substitue ce condensateur à la capacité variable du poste omnibus signalé plus haut. On accorde alors le circuit induit, dans lequel l'intensité atteint 0,7 ampère, et l'on branche à ses bornes un amplificateur-détecteur de haute fréquence (1), muni d'un téléphone. Si le réglage est convenable, des mots chuchotés à 20 mètres du condensateur sont reproduits avec une intensité très forte au téléphone.

Si l'on remplace par une galène le détecteur à lampes on n'entend plus rien quelle que soit l'amplification.

Mais si, au lieu de placer la galène directement dans le circuit secondaire, on l'installe dans un circuit apériodique, sur lequel le secondaire agit par induction, l'audition redevient aussitôt excellente. Or l'intensité efficace dans le secondaire ne dépasse pas 0,3 ampère. Elle est bien plus faible dans le circuit apériodique, les enroulements plats servant au couplage étant placés à 40 cm. l'un de l'autre.

Donc, là encore, la galène ne détecte bien que des courants peu intenses.

Les résultats sont les mêmes si, à l'enroulement inducteur placé dans le secondaire, on substitue une antenne et une prise de sol pour faire de la téléphonie sans fil (2). La réception se fait sur cadre, à 100 mètres environ, avec galène et amplificateur basse fréquence (3). L'audition est excellente.

Ces diverses expériences montrent de manière indiscutable que seuls les courants peu intenses sont rectifiés par les galènes sensibles de façon à donner des phénomènes utilisables pour la réception téléphonique des transmissions de T. S. F.

Au contraire la rectification, commune à toutes les galènes

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 162.
(2) *Id.*, p. 192 et 199.
(3) *Id.*, p. 157.

aux fortes intensités, ne livre que des courants trop faibles pour les applications.

§ III. — Courant interrompu périodiquement

Les courants de basse et haute fréquence étudiés jusqu'ici sont à peu près sinusoïdaux. J'ai voulu voir si j'aurais les mêmes résultats avec des courants variant périodiquement de manière quelconque. Pour cela, j'ai utilisé les circuits d'émission d'un poste militaire de Télégraphie par le sol.

Cet appareil comprend essentiellement une bobine d'induction d'un type spécial, qui a été très étudié. La durée de fermeture du primaire est supérieure à celle de la rupture. Pendant la fermeture le secondaire livre un courant croissant ; à la rupture au contraire il se produit, en sens inverse, un très petit nombre d'oscillations de grande amplitude. La courbe des intensités en fonction du temps est analogue au graphique ci-contre extrait des brochures militaires (fig. 12).

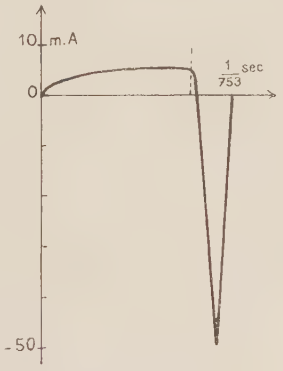

Figure 12.

J'ai essayé de faire à l'oscillographe, aimablement mis à ma disposition par M. Mauduit, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, des photographies du courant fourni par le poste ; mais les papiers dont je disposais n'avaient pas une sensibilité suffisante pour des phénomènes aussi rapides. Cependant j'ai pu déterminer la fréquence $n = 753$, constater que le courant de fermeture se prolonge pendant les 4/5 environ de la période et que son amplitude est le dixième de celle de l'unique oscillation de rupture.

Dans les expériences faites, le courant livré par le secon-

daire traverse une résistance variable (15 à 30 ohms), un ampèremètre, et la galène. Une clé d'inversion permet de changer le sens du courant dans le cristal. Si l'on interrompt le contact entre la pointe et la galène, la f. é. m. appliquée aux bornes est de 50 volts environ ; au cours des oscillations elle atteint 140 volts. Nous prévoyons donc que la rectification sera mauvaise. L'expérience confirme ces prévisions et nous montre que nous avons à faire ici à la rectification de 2e espèce.

Les galènes argentifères ou pures, non sensibles, de même que certains points de la galène artificielle n° 12, ne livrent presque pas de courant à l'ampèremètre.

L'ensemble des autres galènes qui sont sensibles à des degrés très divers, fournissent en *tous leurs points* des résultats constants. Le courant rectifié correspond à un *afflux négatif du cristal à la pointe*. — D'ailleurs ce courant est plus grand pour l'une des positions de la clé d'inversion que pour l'autre, ce qui n'a rien de surprenant vu la dissymétrie des concamérations successives de la courbe.

La galène n° 19 par exemple livre 20 milliampères pour la première position et 30 pour la seconde : la galène n° 25, 30 et 50 milliampères ; la galène n° 17, 30 et 65 milliampères.

Le sens de la rectification est bien celui qui correspond aux grandes énergies et aux forts potentiels. La fraction du courant qui est rectifié n'atteint pas 1/10.

L'intensité du courant interrompu étant grande, le spiral métallique entraîne des fragments de galène ; aussi faut-il, dans ces expériences, nettoyer avec soin la pointe lorsqu'on change de cristal.

§ IV. — Ondes amorties

A quatre ans d'intervalle (1), j'ai fait deux séries d'expériences sur l'action d'un train d'ondes amorties lancé à tra-

(1) *C. R.*, 1916, t. CLXIII, p. 90.

vers des galènes. Dans les deux cas le montage utilisé est le dispositif classique pour effectuer au laboratoire des émissions amorties de T. S. F. Ce montage a servi déjà, en particulier, à l'étude du détecteur électrolytique (1) (fig. 13).

On dispose d'une bobine d'induction. L'interrupteur placé dans le primaire est spécialement étudié pour permettre de rompre le courant une seule fois, et toujours de la même manière (fig. 14). A cet effet on ferme le courant en appuyant sur une lame flexible, par l'intermédiaire d'un levier de bois mobile, qui porte un poids à son autre extrémité. Lorsqu'on abandonne le levier, il s'éloigne avec une vitesse que le poids règle seul. Par suite la lame quitte les pièces métalliques placées en regard très exactement dans les mêmes conditions. Des mesures d'énergie faites au thermogalvanomètre Duddell ont vérifié la constance de cette rupture.

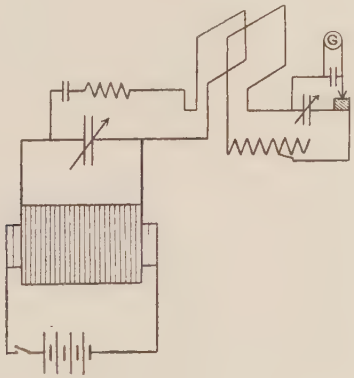

Figure 13.

Aux bornes de l'enroulement secondaire de la bobine, on place une capacité variable sur laquelle le circuit inducteur est monté en dérivation. Ce circuit comprend un enroulement sur plateau pour l'induction, une self de 7 à 10 spires

(1) Etienne, *C. R.* 1916, t. CLXII, p. 717.

de gros fil de cuivre (diamètre 0,55 cm.), et un éclateur constitué par deux prismes de zinc dont les arêtes peuvent être placées à une distance variable l'une de l'autre. On les éloigne toujours au maximum, de façon à n'avoir qu'une étincelle à chaque rupture du primaire, et par suite un seul train d'ondes.

Un second enroulement sur plateau accouplé au premier constitue, avec une seconde self et une capacité variable, le circuit induit qu'on accorde sur l'inducteur. La galène et le galvanomètre sont branchés aux bornes de cette dernière capacité, de façon à constituer un circuit oscillant identique à celui qui a servi pour les ondes entretenues (fig. 11). Les capacités variables sont constituées par des condensateurs à air dans l'un des cas, par des condensateurs plans à lames de verre dans l'autre. Elles ne dépassent pas 0,005 microfarad. Les bobines d'induction ont varié dans les deux séries d'expériences, et par suite, l'énergie de chaque train d'ondes. Les résultats, pour une même énergie, étant les mêmes, je me borne à indiquer ceux des premières mesures.

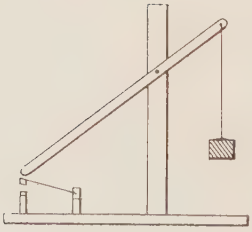

Figure 14.

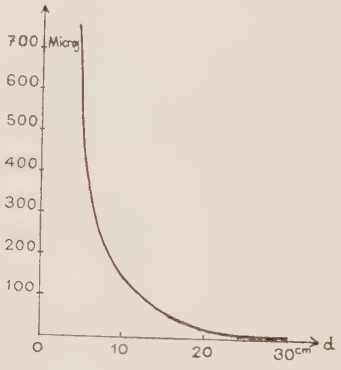

Figure 15.

Au préalable, j'ai étudié la variation de l'énergie du train d'ondes reçu par le circuit induit, lorsque la distance d des

enroulements croît de 8 à 40 cm. La courbe ci-contre donne en microjoules les valeurs de cette énergie (fig. 15). Un thermogalvanomètre Duddell a servi aux mesures.

Les circuits étant ceux qu'on vient de décrire, on lance à travers les galènes des trains d'ondes d'énergie variable. S'il y a rectification, le galvanomètre, fonctionnant comme balistique, accuse un courant de faible durée. Dans les courbes qui suivent, les déviations du spot, mesurées en cm. sont portées en ordonnées, la distance *d* des plateaux étant portée en abscisse.

Ici encore il nous faut distinguer ce qui se passe aux grandes énergies des phénomènes provoqués par les ondes de faible énergie, analogues à celles des réceptions de T. S. F.

Aux *grandes énergies*, galènes sensibles ou non, points sensibles ou non, ne se distinguent qu'à peine. Avec tous les cristaux étudiés, naturels ou sensibilisés, médiocres ou excellents pour la détection, le résultat est le même. Pour chaque train d'ondes d'énergie supérieure à 100 microjoules, il y a rectification. L'amplitude de la déviation au galvanomètre varie d'ailleurs comme l'énergie des ondes ainsi que les courbes l'indiquent (fig. 16. Cf. fig. 15). Le sens de la déviation correspond à un *afflux négatif du cristal à la pointe*.

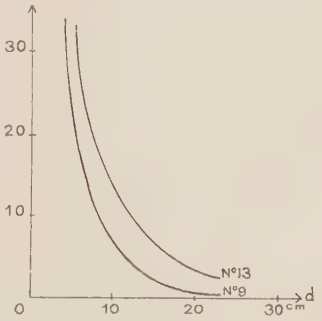

Figure 16.

Réduisons maintenant l'énergie en éloignant les enroulements sur plateaux ; les cristaux sensibles vont se différencier nettement des autres.

Si le point considéré n'est pas sensible, on voit la déviation diminuer peu à peu, puis s'annuler lorsque l'énergie du train d'ondes atteint 20 à 15 microjoules.

Au contraire, en un point sensible, la déviation décroît très vite entre 150 et 30 microjoules, puis elle s'annule et *change de sens*. Le phénomène qu'on obtient alors aux énergies de plus en plus faibles est, de toute manière, irrégulier et instable comme les propriétés détectrices des galènes. La grandeur de la déviation est hors de proportion avec l'énergie des ondes, et varie de manière presque discontinue avec celle-ci. Il semble que le train d'ondes ne fasse que déclancher une f. é. m. instantanée.

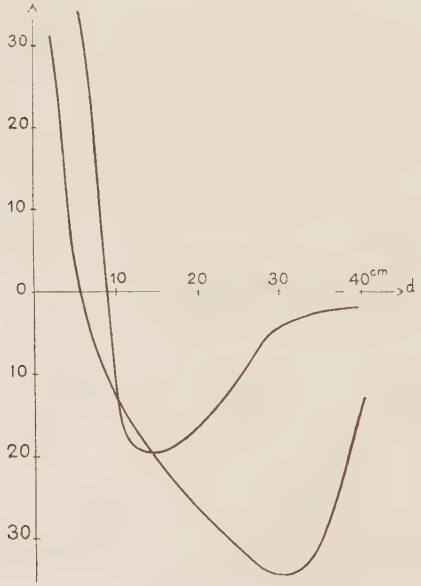

Figure 17.

Suivant la sensibilité du point, cette f. é. m. peut, toutes choses égales d'ailleurs, passer de 1 à 10. Elle correspond toujours à un *afflux positif du cristal à la pointe*.

Les courbes ci-contre (fig. 17) sont établies pour deux points de sensibilité différente d'une même galène. Je les

choisis parmi une cinquantaine d'autres analogues. Les courbes suivantes (fig. 18) donnent, en fonction de l'énergie du train d'ondes, les déviations obtenues avec un point non sensible (galène n° 5) et un point très sensible (galène n° 15).

Le changement de sens de la rectification, caractéristique des galènes sensibles, se produit suivant les cristaux au voisinage de 50, 100 ou 200 microjoules.

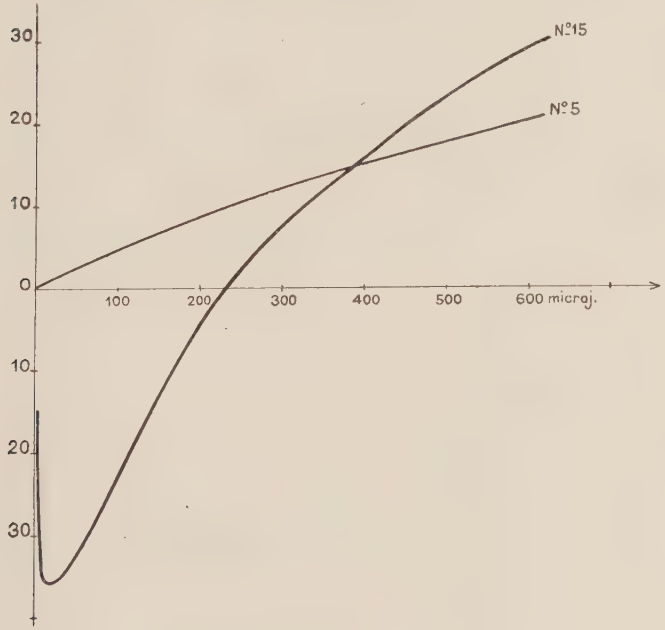

Figure 18.

Comme dans le cas des ondes entretenues, nous constatons ici que *les galènes sensibles ne le sont plus dès que l'énergie des phénomènes devient trop grande.* Alors qu'aux faibles énergies les o des servent seulement à déclancher un phénomène intense et perceptible au téléphone, aux fortes énergies on n'obtient qu'une f. é. m. variant avec cette énergie elle-même, du même ordre de grandeur pour toutes les

galènes, et impropre à une réception téléphonique. Du reste, dans la pratique de la T. S. F., on reçoit rarement des transmissions aussi intenses.

Dans les limites mêmes où la galène est sensible, l'énergie des courants rectifiés n'est en rien proportionnelle à celle des ondes reçues. Il en résulte qu'on ne peut utiliser une galène dans un circuit destiné à mesurer l'énergie à la réception. Du reste le détecteur électrolytique n'est pas préférable. Les méthodes de mesure au téléphone shunté (1), avec détecteur, préconisées en particulier par Pierce et Eccles (2) sont donc entachées d'erreurs systématiques. Les recherches quantitatives ne peuvent se faire actuellement qu'au thermogalvanomètre ou au bolomètre, en proscrivant l'emploi d'un détecteur.

Remarques. — 1° Nous retrouvons ici, comme dans les cas précédents, des phénomènes de *sensibilisation* par les

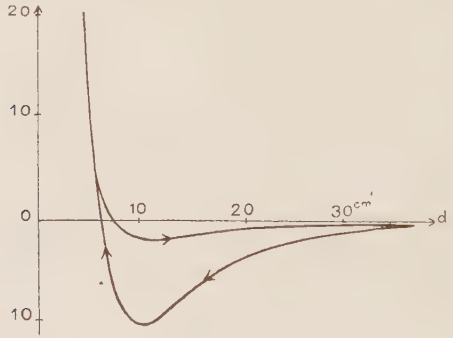

Figure 19.

ondes, qui sont d'ailleurs bien connus. Inversement des ondes de grande énergie diminuent en général, de façon durable, la sensibilité. En partant des faibles énergies et en

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 254.
(2) *Loc. cit.*

rapprochant les enroulements servant à l'induction, puis en les réécartant, on peut faire parcourir à chaque point sensible un cycle irréversible avec réduction notable des propriétés rectifiantes. Je donne ci-contre (fig. 19) une des courbes obtenues en un point de la galène n° 11, primitivement très sensible.

La réduction de la sensibilité débute pour une énergie au moins égale à celle qui provoque le renversement de la rectification.

2° En cours d'expérience, il peut apparaître des *forces électromotrices résiduelles*, mais cela seulement en des points non sensibles. D'ailleurs ces f. é. m. sont instables et ne donnent lieu qu'à des phénomènes transitoires gênants, dont il faut s'affranchir. (Nous n'avons jamais trouvé de forces électromotrices résiduelles importantes que dans des cas où les cristaux ne fonctionnent pas comme détecteurs).

Conclusions. — Comme les dissymétries des caractéristiques le faisaient prévoir, les galènes *sensibles* rectifient les courants alternatifs de *faible intensité*, en livrant un courant continu qui traverse le contact du *cristal à la pointe*. Le résultat est le même qu'on s'adresse à la basse ou à la haute fréquence, que les courants soient ou non sinusoïdaux, que les ondes soient entretenues ou amorties.

Les cristaux non sensibles ne livrent pas, dans ces conditions, de courant appréciable.

Si l'énergie reçue croît, quelle qu'en soit d'ailleurs la forme, les propriétés détectrices s'atténuent, les courants rectifiés diminuent, puis *changent de sens*. A ce moment toute distinction entre galènes sensibles et galènes non sensibles a disparu. Tous les cristaux donnent des courants rectifiés de même sens et du même ordre de grandeur. D'ailleurs l'intensité de ces courants reste faible et varie très régulièrement avec l'énergie reçue.

L'existence de ces *deux modes de rectification*, dont le

premier seul est utilisé en T. S. F., est un caractère essentiel des galènes détectrices.

CHAPITRE IV

COURANTS ALTERNATIFS ET VIBRATIONS SONORES

La galène, traversée par des courants alternatifs, donne lieu à un phénomène sonore qui a été signalé par divers auteurs. Le premier en date est je crois Godin (1) qui, en avril 1913, a déposé au Ministère du Commerce un appareil destiné à mettre en évidence cet effet sonore. De manière indépendante, Dongier et Brazier ont retrouvé cette propriété (2). D'après ces auteurs, lorsqu'un détecteur à cristal est soumis à une différence de potentiel alternative assez grande, les pièces en contact entrent en vibration. Les expériences décrites portent sur le courant alternatif et sur les trains d'ondes amorties de grande énergie (émissions d'Eiffel reçues à l'Observaioire). De l'étude faite, Dongier et Brazier concluent que les phénomènes observés ne sont en rien liés aux propriétés détectrices.

Pour mieux entendre les vibrations sonores, Dongier utilise surtout (3) un dispositif de renforcement acoustique au phonographe, que je décrirai plus loin. Perret-Maisonneuve (1) décrit un détecteur spécial constitué par une galène taillée en pointe et appuyant par quelques points sur la plaque vibrante d'un récepteur téléphonique privé de ses circuits et de ses bobinages. Ce détecteur, intercalé dans un circuit oscillant de réception, permet d'entendre directement les signaux.

Ces phénomènes se rattachant par quelques points à mes

(1) *T. S. F.*, n° 4, avril 1914.
(2) *C. R.*, octobre 1913, t. CLVII, p. 587.
(3) *T. S. F.*, n° 2, février 1914.

recherches sur la galène, j'ai repris leur étude, en la complétant par l'emploi de dispositifs nouveaux, encore inconnus au moment où les premières expériences furent faites.

§ I. — Courant alternatif

Le courant utilisé est celui du secteur (120 volts-50 périodes). Le circuit comprend un fusible, une résistance variable allant jusqu'à 300 ohms, un manipulateur Morse et la galène.

1° *Galène entre plaques métalliques.* — Dans la première série d'expériences, le cristal est serré entre deux plaques de laiton. L'intensité efficace étant d'environ 0,34 ampère, la galène s'échauffe sensiblement mais on n'entend rien : le son, s'il existe, est trop faible. Essayons de l'amplifier, en posant sur la table, au voisinage du cristal, un *sismostéthoscope,* inventé pour l'écoute des bruits souterrains. Aussitôt on entend un son complexe presentant les mêmes caractères, *quelle que soit la galène étudiée.*

A une note fondamentale grave (fréquence 100 environ), se superposent des harmoniques variables selon les plaques de serrage.

On peut se demander quel est le siège de ce mouvement vibratoire. Se produit-il au contact ou dans la masse du cristal ?

2° *Galène entre plaques amalgamées.* — Pour le savoir remplaçons les plaques de laiton par des lames recouvertes d'amalgame de plomb. Avec un serrage suffisant on assure un contact excellent de la galène et de l'amalgame. Dans ces conditions tout phénomène sonore disparaît.

D'ailleurs l'échauffement du cristal n'est plus sensible, et ce résultat ne doit pas nous surprendre, car la résistance est dans ce cas considérablement réduite.

Donc la vibration a pour origine un phénomène localisé, surtout au contact du cristal et des plaques.

La cause semble être l'*échauffement* dû aux grandes résis-

tances de contact. Il se produit une élévation de température à chaque demi-période, et la galène vibre avec une fréquence double de celle du courant.

Naturellement il faut éviter avec soin les étincelles aux contacts, car elles créent des bruits parasites. A titre de contre-épreuve on vérifie qu'un bloc de métal, serré entre deux plaques de laiton, ne donne lieu à aucun phénomène sonore.

3° *Galène entre pointe et plaque.* — Une vibration de même espèce, quoique moins intense, se produit encore lorsque le courant alternatif arrive au cristal par une pointe métallique, c'est-à-dire lorsque la galène est dans une monture de détecteur.

Dans ce cas il est possible de réduire beaucoup l'intensité, une amplification acoustique permettant d'améliorer la perception du phénomène. La pointe entre en vibration plus aisément que les mâchoires qui enserrent le cristal, car la résistance de contact est plus forte et la pièce métallique plus mobile. Pour déceler ces vibrations on utilise, comme l'indique Dongier, une capsule de phonographe. Sur la membrane reproductrice on colle une petite calotte métallique légère qui porte en son centre une pièce conique, à l'extrémité de laquelle on soude une pointe en fil de platine de 0,3 mm. de diamètre. Un fil isolé très souple est aussi relié à cette pièce. Le tuyau de la capsule reproductrice est adapté au pavillon d'un phonographe qui amplifie les vibrations transmises par la membrane.

J'ai perfectionné ce dispositif en installant le cristal dans une monture de détecteur Chaudet (1) qui se trouvait au laboratoire. Deux de ces montures sont fixées, côte à côte sur une planchette verticale, de façon à ce qu'on puisse changer promptement de galène. Des pièces mobiles permettent de régler très rapidement les contacts en des points quelconques.

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 107, fig. 49.

Le circuit comprend comme précédemment une boîte de résistances, un manipulateur et le cristal. Avec ce montage, toutes les galènes donnent, quel que soit le point touché, un son très nettement perçu au phonographe. Ce son est pur (à l'inverse de ce qui se passait tout à l'heure), et il est grave. Repéré par octaves successifs, il semble bien avoir une fréquence voisine de 100. On ne constate *aucune différence marquée entre les galènes sensibles et non sensibles.*

La pression de la pointe a une action déjà signalée par Dongier. Il faut un minimum de pression pour assurer le contact. Au delà et dans d'assez larges limites, la pression agit peu. Cependant aux très fortes pressions la vibration est gênée, le timbre et la hauteur du son varient ; puis la pointe devient rigide et l'on n'entend plus rien. Cet effet de la pression s'explique aisément par les conditions élastiques de la propagation d'un mouvement vibratoire par la pointe de platine jusqu'à la membrane.

Il est naturel d'admettre ici, comme nous l'avons fait plus haut, que la cause des vibrations est un phénomène thermique dû à la grande résistance au contact de la pointe et du cristal.

D'ailleurs des mesures récentes (1) montrent qu'il y a effectivement, au contact d'une galène et d'une pointe métallique, une dilatation appréciable, plus forte quand le courant passe de la pointe au cristal, et qui serait proportionnelle à la « puissance perdue » au contact.

Nous pouvons rapprocher ce phénomène de la vieille et classique expérience du *Trembleur de Trevelyan* (2). La barre de cuivre du trembleur étant chauffée et appuyée convenablement sur un morceau de plomb, on la voit prendre un mouvement vibratoire qui s'accompagne d'un son. Voici l'explication : au contact du cuivre, le plomb se dilate,

(1) Fallou, *C. R.*, 1920, t. CLXX, p. 1308.
(2) Tyndall, *La Chaleur*, IVe leçou. Violle, t. II, p. 13.

repousse la barre qui va toucher un autre point où le phénomène recommence, pendant que le premier point se refroidit. Ce jeu de dilatations et de contractions engendre des vibrations sonores.

Avec la galène l'explication est de tout point la même.

En résumé nous avons établi qu'une galène montée entre des pièces métalliques, et traversée par un courant alternatif, est le siège de phénomènes thermiques, localisés surtout aux contacts à cause de leur grande résistance. Ces phénomènes s'accompagnent de vibrations sonores qu'on peut déceler soit dans la pointe de contact si elle est très mobile, soit dans la masse du cristal, à l'intérieur duquel les vibrations se propagent, si les électrodes sont rigides.

Ce mouvement vibratoire est dû à un effet Joule. Pour une intensité efficace de 0,3 ampères et une résistance de contact de 40 ohms, l'énergie perdue par seconde est 3,6 joules. Elle est encore de 0,036 joule pour chaque demi-période du courant utilisé. C'est suffisant pour que la galène, qui suit thermiquement les oscillations du courant, engendre par ses dilatations périodiques un mouvement vibratoire.

§ II. — Courant interrompu périodiquement

La source de courant utilisée est le poste de T. P. S. dont nous avons parlé. J'ai refait avec cet appareil, de fréquence 800, les mêmes expériences qu'en courant alternatif. Pour éviter les perturbations sonores, le poste est placé à 50 mètres de la galène, deux câbles le reliant au cristal.

1° *Galène entre plaques métalliques.* — Le courant du poste traverse la monture où la galène est serrée entre deux plaques de laiton. L'intensité est voisine de 0,8 ampère.

On constate que la galène *s'échauffe* et se met à *vibrer*.

L'échauffement est sensible au toucher. Il suffit à décomposer avec étincelles de petits fragments de galène antimonique n° 8. Sur une autre galène également serrée entre pla-

ques on dépose une couche uniforme de cire Golaz sur deux faces libres bien clivées : on constate que la cire fond d'abord près des électrodes sur les faces qu'elle recouvre.

Quant au mouvement vibratoire, tous les cristaux, sensibles ou non, le produisent avec une force suffisante pour que, dans toute la pièce, on entende chanter la galène à l'unisson du vibrateur.

On peut éteindre le son en réduisant l'intensité. Il suffit pour cela d'intercaler dans le circuit une résistance variant de 50 à 200 ohms suivant les cas. Cette limite est reculée si l'on place sur la même table que la galène un sismostéthoscope ; il faut alors mettre de 1.000 à 2.500 ohms en circuit pour que le son cesse d'être perceptible. Il semble que les galènes sensibles vibrent un peu mieux que les autres.

A l'oreille le son perçu directement est nettement musical. Au sismostéthoscope, quand la résistance intercalée devient grande, le son se transforme en un bruit qui correspond à l'ouverture et à la fermeture du circuit primaire au moyen du manipulateur. Peut-être se produit-il là des attractions des lames de contact. Le choc correspondant se transmet aux plaques enserrant la galène, et à la table. Il faut un courant plus intense pour que le système entre réellement en vibration.

2° *Galène entre plaques amalgamées.* — Comme c'était le cas avec le courant alternatif, il n'y a plus de phénomènes vibratoires lorsque les galènes sont enserrées dans de l'amalgame de plomb. En même temps la cire Golaz ne fond plus ; il n'y a pas de phénomène thermique intense.

La cause des vibrations obtenues précédemment est donc la même qu'avec le courant alternatif. Reste la question de la fréquence qui est ici égale à celle du vibrateur.

On sait que dans le poste de T. P. S. convenablement réglé, le courant induit pendant la fermeture du primaire est prédominant. Il provoque à chaque période une vibration thermique de la galène. Les courants de rupture sont négli-

geables ; le son perçu a donc même hauteur que celui du vibrateur.

A titre de contre-épreuve on vérifie, en déréglant le poste, que le son perçu n'a plus de hauteur définie.

3° *Galène entre pointe et plaque.* — Un phénomène sonore de même espèce, bien que moins intense, se produit si la galène est dans une monture de détecteur dont la pointe est fixée, comme on l'a vu, à une membrane de phonographe.

Quelle que soit la galène et quel que soit le point choisi, on entend dans le pavillon un son de même hauteur que celui du vibrateur.

L'intensité du son perçu varie d'ailleurs dans de très larges limites avec les diverses galènes, ou avec les divers points d'une même galène.

Les galènes sensibles donnent les meilleurs résultats, surtout en certains points ; il en est qu'on entend encore chanter avec 10.000 ohms dans le circuit. Avec la galène n° 9 le phénomène est net ; il faiblit avec le n° 5.

Plus soigneusement encore qu'on ne l'a fait dans les expériences en courant alternatif, il faut prendre les précautions nécessaires pour éviter les étincelles au contact. Leur effet sonore très marqué est du reste facile à distinguer du son musical du cristal vibrant. On doit en outre nettoyer avec grand soin la pointe quand on change de galène.

Enfin on vérifie, à titre de contre-épreuve, qu'il ne se produit aucun son quand la pointe est appuyée sur le support métallique de la galène.

Là, comme c'est le cas pour le courant alternatif, le phénomène thermique semble bien être la cause du mouvement vibratoire.

§ III. — Ondes entretenues

Le générateur d'ondes entretenues est un poste de téléphonie sans fil, « poste omnibus » déjà décrit au chapitre précédent. La longueur d'onde est voisine de 500 mètres.

La bobine du secondaire qui peut pénétrer plus ou moins profondément à l'intérieur de la self primaire, est reliée aux bornes d'une capacité variable pour constituer un système oscillant qu'on accorde sur le primaire. Aux bornes de cette capacité la galène est montée en dérivation au moyen de deux fils dont les longueurs ont varié de 5 à 50 mètres (fig. 20).

Le cristal est installé dans le contact à amplification

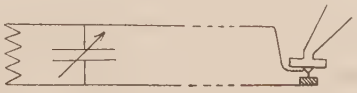

Figure 20

acoustique décrit plus haut. Les étincelles sont soigneusement évitées.

1° *Interruptions périodiques.* — On ne peut espérer obtenir un phénomène vibratoire sensible à l'oreille avec des ondes entretenues employées telles quelles, car leur fréquence est ici de 600.000.

Comme dans les transmissions de T. S. F., il faut donc greffer sur les ondes un second phénomène à période musicale.

Pour cela, on peut d'abord couper périodiquement les circuits. On utilise un diapason entretenu électriquement, de fréquence 800. Un dispositif permettant de faire varier la durée des contacts par rapport à celle de l'oscillation n'a pas eu d'influence sensible sur les résultats : si l'on admet que le contact reste établi pendant 1/10 de la période du diapason,

le nombre d'ondes à chaque train atteint 75, ce qui suffit pour que le régime soit établi.

Le diapason a été placé d'abord dans le circuit plaque des lampes, ensuite dans le circuit secondaire pour assurer un meilleur fonctionnement de l'émission.

Les résultats sont les suivants :

Le passage de trains d'ondes entretenues à travers une galène quelconque donne, à peu près en tous les points, une vibration synchrone du train, qui reproduit au phonographe le son du diapason.

Les phénomènes sont plus intenses et les sons plus musicaux avec les galènes sensibles. Les autres donnent fréquemment lieu à des grésillements. On n'entend d'ailleurs aucun son lorsque la pointe de contact est appuyée sur une plaque métallique.

Enfin, si l'amplitude des ondes croît par adjonction de nouvelles lampes à l'émission, le son perçu ne varie pas sensiblement. Comme dans le cas de la détection, l'accroissement d'énergie, au delà de certaines limites, n'améliore pas les résultats.

Par analogie avec les phénomènes observés en courant alternatif, nous pouvons penser que la vibration est due, là encore, à une totalisation de l'effet thermique produit par chaque train d'ondes. Les galènes sensibles résonnent mieux que les autres sous l'effet de ces vibrations successives. Peut-être aussi l'intensité plus grande du son tient elle à la rectification qui totalise mieux l'effet des ondes.

La rupture et l'établissement du contact ne se produisent pas, en général, au début d'une onde. Il y a donc un phénomène de choc qui peut faire confondre l'effet des ondes entretenues avec celui d'un courant intermittent. Pour écarter la possibilité d'une erreur d'interprétation, nous allons faire interférer dans un même circuit deux systèmes d'ondes entretenues.

2° *Interférence d'ondes.* — J'utilise pour cela deux postes

d'émission analogues, réglés sur des longueurs d'ondes assez voisines pour que les interférences donnent des battements à fréquence musicale.

Deux montages ont été successivement étudiés. Dans le premier, les enroulements induits des deux postes sont accordés séparément sur une même capacité. La galène est montée en dérivation sur cette capacité, aux bornes de laquelle se font les interférences. Ce dispositif prête à la critique, à cause de la dépendance des circuits induits qui entraîne des réactions d'un poste sur l'autre.

Aussi en ai-je installé un second dans lequel les enroulements inducteurs des deux postes sont couplés, de façon lâche, avec l'unique enroulement induit du circuit oscillant figuré plus haut (fig. 20). Le réglage est un peu meilleur dans ce cas ; cependant les résultats restent les mêmes.

D'ailleurs ce réglage est délicat. Le calcul classique sur la formule des battements (1) montre que si l'une des longueurs d'onde est 300 mètres, l'autre doit être comprise soit entre 294 et 299, 995 mètres, soit entre 300,045 et 306 mètres pour que les battements aient une fréquence perceptible à l'oreille (de 15 à 20.000). Par suite il faut que la capacité de l'un des deux postes soit susceptible de très minimes variations. Il m'a été commode, à cet effet, d'adjoindre à l'un des condensateurs un compensateur Mesmy qui permet un réglage très précis de la longueur d'onde.

Voici les résultats obtenus :

Le fil de platine appuyant en un *point quelconque d'une galène sensible*, ou en *certains points d'une galène non sensible*, la membrane du phonographe est le siège de vibrations qui reproduisent, comme le ferait un téléphone, les sons caractéristiques du réglage d'une lampe hétérodyne.

On obtient en effet, lorsque les deux postes sont presque accordés, un son musical dû aux battements. La hauteur

(1) V. Rothé, *op. cit.*, p. 196.

décroît ou croît suivant qu'on se rapproche ou qu'on s'éloigne de l'unisson. Au voisinage immédiat le son passe par une sorte de piaulement caractéristique, pour redevenir musical lorsque l'unisson est dépassé.

Avec les galènes sensibles on n'obtient *jamais de sons graves*. On ne peut descendre au-dessous du « la_4 » sans que tout se perde en un bruit de crissement. Les sons aigus sont très intenses. Les galènes non sensibles donnent des sons moins intenses et en général plus graves.

Enfin, si l'on réduit le couplage des circuits, les sons aigus sont les premiers à disparaître.

3° *Reproduction de la parole.* — Un dernier dispositif permet de montrer avec quelle fidélité les vibrations sonores de la galène suivent les variations de régime des ondes entretenues. On monte un poste de téléphonie sans fil avec le circuit induit déjà décrit (fig. 20) dans lequel on intercale simplement, à côté de la bobine secondaire, un microphone et un ampèremètre destiné à vérifier l' « accrochage » des oscillations. Les fils réunissant la galène sensible à la capacité ont 50 mètres de long, si bien que le phonographe est dans un autre bâtiment que le microphone. Les circuits sont accordés en couplage lâche.

On parle dans le microphone, ce qui provoque des oscillations de l'aiguille de l'ampèremètre. Au phonographe *la voix est reproduite* aussi bien que dans les meilleures expériences de téléphonie sans fil. Il n'y a pas avantage à parler très fort, ni à employer des courants très intenses.

Ce dispositif m'a permis d'obtenir pour la première fois sans téléphone, la reproduction directe de la parole par un détecteur haut-parleur à amplification acoustique (1). Depuis lors, des expériences du même ordre ont été reprises par Dongier (2).

(1) *C. R.*, 1920, t. CLXX, p. 1378.
(2) *C. R.*, 1920, t. CLXXI, p. 238.

La galène suit par une vibration élastique les battements des trains d'ondes, comme le ferait la membrane d'un téléphone par l'intermédiaire des courants induits que provoquent ces battements.

Mais au téléphone, seuls certains points d'un petit nombre de galènes apparaissent comme sensibles, c'est-à-dire comme susceptibles de totaliser les trains d'ondes à fréquence musicale, pour en faire des courants interrompus de même fréquence, que le téléphone peut suivre. Au contraire, toutes les galènes vibrent dans le détecteur haut-parleur.

Sans doute elles vibrent à des degrés divers ; il n'en reste pas moins que la propriété mise en évidence subit, dans les divers cristaux, des variations de moindre amplitude que la sensibilité.

Cependant ce phénomène vibratoire est lié à une rectification très effective des ondes entretenues, rectification qui se produit même avec les galènes non sensibles. En effet si l'on intercale un galvanomètre sur le trajet d'un des fils qui relient la galène à la capacité variable, on constate une déviation notable Avec les galènes sensibles, elle est si forte qu'il faut réduire énormément l'induction des circuits, et ne faire fonctionner le poste que pendant une fraction de seconde. Le courant instantané produit dépasse 400 micro-ampères, un seul poste étant utilisé.

Les galènes non sensibles donnent un courant qui ne dépasse pas 30 microampères ; il est de même sens que le précédent c'est-à-dire qu'il traverse le contact du cristal à la pointe.

Au premier abord, ces résultats semblent ne pas concorder pleinement avec ceux que nous avons rencontrés jusqu'ici. Ils nous amènent à penser que des galènes, classées comme « non sensibles » par l'étude au buzzer, ont cependant une certaine sensibilité, au moins en ondes entretenues. On peut admettre chez ces cristaux l'existence d'une inertie que les ondes entretenues vaincraient mieux que les autres par la

régularité de leur action. Ces galènes, à inertie plus grande, suivent d'ailleurs moins bien que les autres les battements.

Les phénomènes de sensibilisation électrique se rattachent tout naturellement à cette hypothèse.

Avec certains cristaux non sensibles, nous avons vu que les sons aigus disparaissent en premier lieu, lorsqu'on réduit le couplage ; ce fait confirme l'existence d'une inertie que seule une énergie suffisante peut vaincre.

Si cette énergie s'accroît notablement, nous savons que les qualités détectrices des galènes sensibles s'atténuent ; d'autre part les phénomènes vibratoires deviennent plus intenses, les propriétés sonores des cristaux sensibles et non sensibles s'uniformisent donc ainsi qu'on l'a constaté.

Nous avons vu que le phénomène est resté sensiblement le même lorsqu'on passe des ondes entretenues, périodiquement coupées, aux battements produits par interférence. Dans ce dernier cas, les variations d'amplitude nous rapprochent des trains d'ondes amorties dont nous allons étudier l'effet.

§ IV. — Ondes amorties

J'ai employé comme source les courants d'émission d'un poste mixte d'infanterie de la T. M. L'interrupteur de la bobine d'induction est perfectionné. Le circuit inducteur, dérivé sur l'éclateur de la bobine, comporte une self variable, des bouteilles de Leyde, et un enroulement sur plateau. Un second enroulement identique est couplé de façon plus ou moins lâche avec le premier. Deux fils de ligne de 50 mètres le réunissent à la galène, montée dans le détecteur à amplification acoustique. Ce circuit induit est apériodique ; par suite on ne peut l'accorder sur l'émission, et l'énergie reçue reste assez faible.

On évite soigneusement les étincelles au détecteur, sources de bruits parasites, et l'éloignement de la bobine a pour but de supprimer les perturbations.

En tout point d'une galène sensible on obtient un effet sonore très net dont la fréquence reste celle du vibrateur. Avec une galène *non sensible*, *certains points* seulement donnent un son, *beaucoup plus faible* que dans le premier cas et dont l'intensité varie avec l'énergie des trains d'ondes.

J'ai modifié dans une large mesure les selfs et les capacités du circuit inducteur. L'action des selfs n'est pas caractérisée ; nous en verrons la raison. Par contre, dans la mesure où l'oreille permet d'en juger, l'accroissement de la capacité renforce toujours le son produit.

Aux faibles énergies les galènes non sensibles ne donnent aucun effet sonore quelles que soient la self et la capacité ; l'énergie croissant, ces cristaux commencent à rendre un son dont l'intensité grandit avec la capacité et l'énergie. Avec les galènes sensibles, aux très faibles énergies l'audition s'améliore si la capacité croît ; aux énergies plus fortes le son est tellement intense qu'on ne peut mettre en évidence une action de la capacité. Au delà d'une certaine limite, la variation de l'énergie n'a plus d'influence appréciable sur le phénomène sonore.

C étant la capacité, si la self L varie, la résistance R varie en même temps suivant une loi mal connue. L'action de ces deux variations sur l'amortissement

$$\delta = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

n'est pas nettement définie.

Par contre si la capacité C varie seule, l'amortissement δ et la pseudo-période T des oscillations amorties varient proportionnellement, car

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Si l'on admet que l'action des ondes amorties sur la galène se poursuit tant que leur amplitude ne tombe pas au-dessous d'une fraction déterminée de l'amplitude initiale, un calcul

élémentaire montre que, à chaque train, les ondes agissent pendant le même temps, lorsque C varie.

Avec les données d'une des expériences, on trouve que la durée d'action des ondes est 1/35 de l'intervalle séparant deux trains successifs de fréquence 800. Dans les expériences en ondes entretenues l'action des ondes se prolongeait environ 7 fois plus.

En ondes amorties, il y a donc surtout un effet de choc répété 800 fois par seconde pendant 1/28.000 de seconde, choc qui engendre chaque fois une vibration sonore.

Conclusions. — De manière très générale, un contact métal galène entre en vibration sous l'action d'un courant électrique périodique à fréquence musicale. L'intensité des vibrations est liée à l'énergie du phénomène. Cette propriété est bien plus répandue que la sensibilité définie par la réception téléphonique ou par la dissymétrie des caractéristiques. Le phénomène semble d'origine purement thermique, les variations périodiques de chaleur dégagée par effet Joule au contact, provoquant des dilatations rythmées qu'on a pu mesurer, et engendrant un mouvement vibratoire.

Si l'on s'adresse aux trains d'ondes interrompues ou modifiées périodiquement avec une fréquence musicale, on obtient encore des phénomènes sonores de même fréquence, mais on constate que la propriété de vibrer n'est plus uniformément répandue dans toutes les galènes ; elle suit les variations des qualités détectrices. Le phénomène vibratoire permet donc, lui aussi, de déceler la sensibilité des cristaux, bien qu'avec une acuité moins grande que les mesures électriques.

Par analogie avec le cas précédent, nous sommes conduits à attribuer, là encore, les vibrations à une cause thermique. Mais alors comment expliquer la différence entre galènes sensibles et galènes non sensibles ?

Tout concorde à prouver que l'inertie électrique des points très sensibles est faible ; la rectification suit donc les ondes

et fournit dans un sens des demi ondes d'amplitude exagérée, alors que dans l'autre elles sont presque supprimées. Il se peut que l'énergie reçue sous cette forme, soumise à des variations de plus grande amplitude et deux fois moins fréquentes qu'avec un cristal ordinaire, soit plus aisément totalisée par la galène pendant la durée de chaque train. Il s'agit en effet d'une énergie transformée en chaleur, et les phénomènes thermiques ne sont jamais très rapides.

Lorsque l'inertie électrique grandit, la galène ne rectifie pas isolément chaque onde ; il y a retard, et totalisation électrique ; la forme de l'énergie reçue est sans doute moins favorable, et les vibrations moins intenses.

Enfin avec des galènes non sensibles, il n'y a plus de rectification ; l'inertie électrique est plus grande et la galène additionne mal les échauffements produits à chaque demi onde ; le phénomène vibratoire reste faible.

La différence entre cristaux sensibles et non sensibles se marque davantage avec les trains d'ondes amorties qui, dans les expériences réalisées, n'agissent que pendant un temps très court, ce qui permet difficilement à un état de régime de s'établir.

CHAPITRE V

HYPOTHÈSES SUR LES CAUSES DE LA SENSIBILITÉ

§ 1. — Sensibilité

1° Caractères des points sensibles. — Les phénomènes électriques présentés par les galènes peuvent se résumer ainsi :

En courant continu les cristaux conducteurs, et en particulier les galènes, ne suivent pas la loi d'Ohm.

Aux intensités inférieures à 10 ou 15 milliampères, certaines galènes présentent en certains points des *dissymétries* qui font prévoir une rectification de sens déterminé. Ce sont

les galènes *sensibles*. Cette rectification se produit effectivement en courant alternatif, en ondes entretenues ou amorties et dans le sens prévu. Le galvanomètre et l'oscillographe permettent de le constater. Le courant rectifié est d'ailleurs comparable au courant efficace reçu.

Aux intensités continues plus fortes, *toutes les galènes* présentent des dissymétries assez légères et de sens inverse des précédentes. Comme ces dissymétries le font prévoir, toutes les galènes sont susceptibles de rectifier des courants alternatifs ou des trains d'ondes de très grande énergie. Le courant produit est de sens inverse du courant obtenu pour de faibles énergies et des points sensibles. Il est très peu intense, bien que l'énergie reçue soit grande, mais il varie régulièrement avec cette énergie. Cette rectification de deuxième espèce n'offre qu'un intérêt secondaire pour les questions de T. S. F., où les intensités reçues sont petites en général. Elle ne livre du reste que des courants trop faibles pour être utilisés pratiquement. Elle commence précisément au point où les propriétés propres aux galènes sensibles finissent, et finissent d'une manière irréversible, avec destruction du contact sensible, par un phénomène que nous avons déjà comparé à la rupture de l'isolant d'un condensateur soumis à une différence de potentiel trop élevée.

Nous laisserons donc de côté ce second mode de rectification ; il ne se présente que comme une prohibition à l'emploi des galènes sensibles dans certaines conditions.

Quant aux phénomènes sonores manifestés par les galènes lorsque des ondes ou des courants variables d'intensité suffisante traversent le cristal, nous avons vu qu'il faut les rattacher à des dilatations et contractions périodiques, d'origine thermique. Nous avons montré aussi qu'on peut justifier les particularités que présentent les galènes sensibles en invoquant des phénomènes d'inertie thermique.

En dehors des propriétés rectifiantes, les points sensibles présentent les caractères suivants : les résistances de contact

sont grandes, mais les forces électromotrices résiduelles sont faibles, ce qui dénote une absence presque totale d'inertie électrique. Cependant nous avons vu que les variations de fréquence des ondes entretenues permettent, même en ces points, de manifester quelque inertie électrique.

La répartition des points sensibles sur le cristal est en général assez irrégulière. Pourtant, sur des blocs cristallins bien clivés, ces points ne se rencontrent guère qu'au voisinage des arêtes et des failles. Ils sont rares sur les faces polies. Au contraire, avec les galènes faites de petits cristaux enchevêtrés, on peut trouver des points sensibles partout. Ces galènes sont les plus couramment employées.

2° *Action du courant sur les contacts sensibles.* — Pour pénétrer plus avant dans les phénomènes qui se passent au contact de la pointe métallique et d'un point sensible, nous pouvons faire passer des courants continus à travers ce contact, et chercher à déceler optiquement ou électriquement les changements produits.

Si le courant ne dépasse pas 3 ou 4 milliampères, on n'observe aucune modification au microscope, même si le passage du courant se prolonge pendant des heures. Il n'y a pas d'adhérence sensible de la pointe à la galène. Les variations de la résistance de contact sont faibles. Cependant on constate en général une légère tendance à un *accroissement de résistance*. Cet accroissement est surtout marqué pour la pointe par laquelle entre le courant (1/60 de la résistance totale, au lieu de 1/100).

Si l'on admet l'existence d'une décomposition électrolytique même infime, le soufre de la galène doit, dans ce cas, apparaître sur la pointe, ce qui justifie l'accroissement de résistance. En dehors même de toute hypothèse, s'il se produit une altération de contact, elle est liée à l'effet Joule qui est plus fort à la pointe par laquelle pénètre le courant.

La *sensibilité* du point n'est pas atteinte tant que le courant ne dépasse pas 10 milliampères. Au delà elle est *réduite*

et ceci plus vite pour la pointe par laquelle entre le courant. L'intensité seule intervient dans cette perte progressive de sensibilité et non la durée du courant dans les limites étudiées. A partir de 50 milliampères pour la pointe positive, de 65 à 70 pour l'autre, la sensibilité est détruite.

Si le courant continu atteint et dépasse ces intensités critiques, le contact est complètement détruit. La galène échauffée se creuse en un petit cratère où le cristal fondu adhère à la pointe. Quand on les sépare la pointe peut entraîner une gaine de sulfure très visible au microscope ; en l'appuyant alors sur une plaque métallique, on constitue un détecteur peu durable sans doute, peu sensible, mais suffisant pour déceler au téléphone les vibrations d'un buzzer.

Lors même qu'il n'y a pas arrachement de sulfure cristallisé sous-jacent, la pointe reste ternie après le passage de ces courants intenses. Si on l'appuie sur du métal, la résistance du contact est de 10 à 20 ohms.

En somme, l'étude directe d'un contact sensible après le passage d'un courant ne nous renseigne guère que sur les conditions où la rectification cesse.

3° Sensibilisation et désensibilisation. — Un courant intense, même très court, occasionne, je viens de le dire, une perte définitive de sensibilité. Il en est de même pour tous les phénomènes électriques intenses : trains d'ondes ou décharges atmosphériques. Cet inconvénient a fait préférer le détecteur électrolytique aux détecteurs à cristaux dans certaines applications (marine, aviation).

Sans aller même jusqu'à cette destruction visible du contact par une étincelle, nous avons vu que le bon fonctionnement de la galène détectrice nécessite une réduction de l'énergie et des potentiels. Là encore, le mauvais fonctionnement tient, sans doute, à une modification défavorable de l'état électrique de la couche de contact.

De même, la sensibilité peut être détruite si, mécaniquement, l'on endommage cette couche : en appuyant trop la

pointe sur un point sensible, en râpant ou limant la surface du contact, on supprime les propriétés détectrices tout comme en chauffant de manière trop intense.

Enfin la présence d'un acide ou d'une base diluée annule la rectification, par attaque superficielle du sulfure ou du soufre qui peut se trouver en excès.

Dans ces divers cas l'explication du phénomène constaté est la même : par voie chimique, mécanique ou électrique, on provoque une *modification* ou une *rupture de la couche de contact*, entre la pointe métallique et le cristal, et cette transformation entraîne la perte de la sensibilité.

Donc il faut conclure que, de même que la résistance du cristal était en majeure partie une résistance de contact, la sensibilité de certains points du cristal est liée à un état particulier, et d'ailleurs fragile, de la surface cristalline, toute altération mécanique, électrique ou chimique, un peu profonde de cette surface supprimant définitivement la sensibilité.

Inversement on peut, comme je l'ai déjà dit, *créer ou améliorer la sensibilité* de certains points ou de certains cristaux.

1° Cette amélioration peut se produire *électriquement* en des points donnés. Je rappelle ici, et c'est un fait bien connu, que des trains d'ondes de faible énergie traversant un contact peuvent en accroître énormément la sensibilité. Dans le même ordre d'idées, pour remettre en état un détecteur soumis à des décharges excessives, on a préconisé l'emploi d'un trembleur auxiliaire (1). Enfin nous avons signalé des phénomènes d'inertie électrique que les ondes entretenues mieux que les autres arrivaient à vaincre. Dans ce cas, il semble naturel de supposer une orientation, par les ondes, d'éléments électrisés un peu mobiles dans la couche de contact.

(1) *T. S. F.*, mars 1913.

2° *L'échauffement* du point de contact peut aussi améliorer les propriétés rectifiantes. Si l'on élève peu à peu la température de la pointe qui touche la galène, au moyen d'un dispositif que nous décrirons plus loin, on constate que la sensibilité, d'abord diminuée par l'échauffement, se rétablit très vite au passage des premiers trains d'ondes, et devient en général très supérieure à ce qu'elle était auparavant.

Autrement dit, après un léger échauffement, la sensibilisation par les ondes se produit dans de meilleures conditions.

Il est naturel de penser que les éléments électrisés s'orientent plus aisément lorsqu'une agitation thermique intense a vaincu leur inertie. L'échauffement jouerait ici le même rôle que les secousses données au papier qui supporte la limaille, dans les expériences de spectres magnétiques.

Il se peut du reste aussi que la chaleur provoque ou favorise une réaction chimique accroissant la sensibilité.

Si l'élévation de température devient plus forte, la résistance au contact croît, la sensibilité diminue, et, dès qu'on arrive à une modification profonde de la couche de contact avec adhérence de la pointe au cristal, il y a destruction complète des propriétés rectifiantes.

3° Par voie *chimique* enfin, on peut sensibiliser non plus certains points, mais toute la surface d'une galène. Les procédés pour faire des galènes sensibles abondent dans les Revues s'occupant de T. S. F. (1). Je n'entrerai point dans le détail ; mais tous ceux dont j'ai eu connaissance se ramènent à des *persulfurations*, le soufre étant accompagné fréquemment de tellure, de sélénium ou de bismuth, éléments dont certains sont voisins du soufre, et qui sont tous électropositifs comme lui. Au contraire, la présence d'autres métaux ne semble point nécessaire, comme l'a montré l'étude du spectre d'étincelles de diverses galènes sensibles.

De plus, tous ces procédés nécessitent un tour de main.

(1) *T. S. F.*, années 1913 et 1914.

Les persulfurations donnant des galènes sensibles ne se produisent ni normalement, ni facilement; de même que les galènes naturelles ne sont pas en général des galènes sensibles. Les cristaux sensibles ne se forment que dans des conditions délicates à réaliser; il faut opérer à chaud, de préférence dans un milieu « où la cristallisation soit hétérogène », où les tensions cristallines soient rendues dissymétriques, par exemple par des jets de vapeur (1).

La trempe de galènes chauffées à 1.200°, et refroidies brusquement dans un bain de mercure, suffit à les sensibiliser (2). Il est vrai que cette trempe peut amener une précipitation de fines particules de soufre à la surface du cristal.

Par tous leurs caractères les réactions de sensibilisation se montrent donc instables et difficiles à produire. L'impression est confirmée par le fait que certains cristaux perdent rapidement leur sensibilité, en particulier les cristaux traités au sulfure de carbone.

Donc la sensibilisation chimique se fait par action du soufre ou de corps voisins sur la couche superficielle de la galène, dans des conditions irrégulières, favorables à des cristallisations dissymétriques et à des phénomènes de faux équilibre.

Nous ne devons pas nous étonner de voir le soufre jouer ici un rôle essentiel. On sait combien les propriétés de cet élément varient, suivant les phases multiples sous lesquelles il se présente. Dans la pellicule superficielle des galènes sensibles, le soufre se trouve en couche mince, probablement en particules très divisées. Cet état physique doit influer sur ses propriétés. Ne savons-nous pas que la fusion des couches monomoléculaires d'un éther gras, comme la trimyristine, montre que la phase solide stable en couche mince est insta-

(1) *T. S. F.*, juin 1913.
(2) *T. S. F.*, février 1914.

ble en masse compacte ? Des phénomènes analogues peuvent se produire ici.

Quant aux galènes naturelles, il est plausible de penser que leur mode de sensibilisation est à peu près le même que celui des galènes artificielles. Au sein des eaux sulfureuses où se sont formés les cristaux de galène, il a pu se produire des persulfurations surtout au voisinage des arêtes et des failles, où les points sensibles se rencontrent le plus fréquemment. La rareté même des galènes naturellement sensibles s'explique, si des conditions délicates et instables sont nécessaires à leur formation.

En résumé nous voyons que la sensibilité de certaines galènes ou de certains points est liée à un état particulier de la pellicule de surface. Nous avons vu, du reste, que cette sensibilité n'entrait en jeu que pour des actions électriques comprises entre certaines limites. De nombreux agents peuvent modifier temporairement cette pellicule, ou la détruire de façon définitive. Inversement la sensibilité peut être améliorée par le passage d'ondes électriques avec ou sans échauffement. On peut aussi créer cette couche de contact sensible par voie chimique, sous l'action d'éléments électropositifs, et, fondamentalement, de soufre. Il semble probable que les galènes naturelles sensibles se soient formées de cette manière.

Tel est, au point de vue expérimental, l'état de la question.

§ 2. — Hypothèses antérieures

1° *Polarisation électrolytique.* — Au premier abord, l'analogie de fonctionnement entre le détecteur électrolytique et les détecteurs à cristaux est telle, que ces derniers ont été regardés par certains chercheurs comme de véritables piles sèches. Une force électromotrice de polarisation de sens déterminé expliquerait, comme pour le détecteur électrolytique, la dissymétrie des caractéristiques. De plus une décom-

position électrolytique du sulfure, fût-elle très superficielle, en enrobant de soufre la pointe métallique lorsqu'elle fonctionne comme anode, accroîtrait notablement la résistance pour ce sens du courant. L'action secondaire d'un début d'électrolyse solide est donc conforme aux résultats expérimentaux. D'ailleurs la présence d'une pellicule humide qui pourrait favoriser l'électrolyse a été fréquemment décelée (1). Enfin il est facile d'interpréter le rôle essentiel d'un élément déterminé comme le soufre.

Jusqu'ici l'hypothèse paraît satisfaisante. Mais sous cette forme simple elle ne réussit pas à expliquer les modifications électriques de la sensibilité, le mauvais fonctionnement sous de fortes énergies, la sensibilisation par les ondes, et, en général, tous les phénomènes qui s'interprêtent par des orientations de particules mobiles. S'il s'agit, là encore, de polarisation et d'électrolyse, il faut admettre que, dans la couche de contact, ces phénomènes ne présentent ni la constance, ni la régularité de ceux qu'on suppose exister au sein d'un liquide.

De plus, un contrôle expérimental s'impose : une f. é. m. de polarisation, suffisante pour expliquer la dissymétrie des caractéristiques, doit être aisément mesurable. Or, avec tous les montages successifs, nous avons vu qu'on n'est pas arrivé à déceler cette f. é. m. Il faudrait admettre qu'elle disparaît instantanément, car les f. é. m. résiduelles, lorsqu'il y en a, ne peuvent en aucune manière expliquer la rectification. D'ailleurs tous les chercheurs préoccupés de déceler cette f. é. m. de polarisation ont abouti à cette conclusion (2).

De même, dans les conditions expérimentales réalisées, les efforts faits pour montrer le rôle de la quantité d'électricité

(1) Huizinga, *Physikalische Zeitschrift*, 1920, p. 91 ; Frl. Szekely, *Wiener Berichten*, 1918, p. 127.

(2) V Pierce, Streintz, Frl. Szekely, *op. cit.*

dans la création d'un contact sensible ont été vains. Cependant si la dissymétrie est due à une pellicule analogue à une couche polarisée (1) et se reformant à chaque demi-période, une quantité minimum d'électricité est nécessaire à sa formation. Il est vrai que cette quantité peut être extrêmement faible et que nos méthodes d'investigation peuvent rester très au delà de cette limite. Ce qui amène à le croire, c'est le phénomène d'inertie électrique que nous avons signalé pour des galènes sensibles, soumises à des ondes entretenues de haute fréquence. Dans le même ordre d'idées, il arrive souvent que les caractéristiques n'offrent qu'une faible dissymétrie au voisinage immédiat de l'origine, dissymétrie qui s'accentue nettement dès que le potentiel atteint 0,05 volt. Ces faits peuvent s'interpréter en admettant qu'une quantité minimum d'électricité est nécessaire à la sensibilisation d'un contact, quantité extrêmement faible d'ailleurs. Par suite, en pratique, un point sensible se présente d'emblée comme tel, si la différence de potentiel appliquée aux bornes est voisine d'un volt.

Donc l'hypothèse d'une polarisation électrolytique, homologue en tous points de celle qui existe entre une électrode et de l'eau acidulée, n'est pas acceptable. Par contre je regarde comme probable un état spécial de polarisation, aisément modifiable par de faibles courants, état dans lequel des particules électrisées liées à des atomes matériels joueraient un rôle par leurs légers déplacements et leur orientation.

2° *Thermoélectricité.* — La théorie thermoélectrique des détecteurs à cristaux se présente aussi très naturellement à l'esprit, et non sans certaine vraisemblance. J'ai insisté sur la grande résistance du contact métal-galène. Il s'ensuit un effet Joule marqué, quelle que soit la forme de l'énergie électrique qui traverse le contact. Des forces thermoélectriques

(1) V. Flowers, *loc. cit.*

sont donc développées, et leur sens ne dépend pas du sens du courant, mais simplement des résistances, des surfaces de contact, et des conditions de refroidissement. Voilà une explication très plausible et très simple des propriétés rectifiantes. Il suffit que les forces thermoélectriques aient la grandeur et le sens voulus.

Pour vérifier le bien fondé de cette hypothèse, on peut échauffer une pointe métallique, puis l'appuyer sur une galène et mesurer au moyen d'un galvanomètre peu résistant la f. é. m. créée. On se rapproche ainsi de l'échauffement dû au passage d'ondes ou de courants à travers un contact métal-galène.

La pointe métallique utilisée est en laiton, comme la cuvette dans laquelle est serré le cristal, et l'on vérifie, *à priori*, qu'aucune f. é. m. ne se développe si l'on appuie la pointe chauffée sur la cuvette.

La résistance au contact du cristal et de la cuvette est faible. La grande résistance et l'échauffement principal sont localisés au contact de la pointe et de la galène.

Cette pointe porte deux soudures, l'une à 1 mm. à peine de son extrémité inférieure, l'autre 2 cm. plus haut. soudures auxquelles aboutissent des fils où l'on peut lancer un courant de chauffe de 10 à 30 ampères. Par seconde l'énergie développée dans la pointe varie de 0,8 à 3 joules environ. Elle se transforme en chaleur; mais les pertes par conductibilité et rayonnement sont telles qu'après 8 à 10 secondes on atteint un état stationnaire avec échauffement maximum.

A ce moment, l'élévation de température doit déjà être comparable à celle qui se produit lorsqu'un train d'ondes de 100 microjoules environ, ou un courant alternatif de 50 milliampères, traverse le contact; nous sommes donc au point de vue thermique dans les conditions réalisées lors de la rectification de seconde espèce.

Pour chaque expérience, la pointe ayant été échauffée, on coupe le courant et l'on appuie la pointe sur la galène ; un

galvanomètre ferme le circuit. On constate alors que *toutes les galènes ont un pouvoir thermoélectrique marqué*. Le galvanomètre accuse, pour l'échauffement maximum, des f. é. m. variant, en général, de 0,2 à 2 millivolts.

Le *signe* du pouvoir thermoélectrique *varie suivant les galènes*. Dans les conditions réalisées, on n'a pas pu, pour une même galène, mettre en évidence un renversement de signe lorsque la température s'élève.

Les galènes non sensibles, pures ou argentifères, donnent les mêmes résultats qu'un premier groupe de galènes sensibles qui comprend les cristaux clivés. Le courant, pour tous ces échantillons, va du cristal à la pointe à la soudure chaude. D'ailleurs les f. é. m. peuvent atteindre 4 millivolts.

Un second groupe comprend toutes les autres galènes sensibles faites de cristaux enchevêtrés. Pour celles-là le courant va du métal au cristal à la soudure chaude; les f. é. m. ne dépassent pas 2 millivolts. En général, elles ne varient même que de 0,3 à 0,5 millivolt pour l'échauffement limite, et elles durent nettement moins qu'avec les galènes précédentes. Aux faibles échauffements ces f. é. m. cessent d'être mesurables.

Or nous avons vu que la rectification spéciale aux grandes énergies donne, pour toutes les galènes sensibles, un afflux négatif du cristal à la pointe, ce qui s'accorde bien avec l'effet thermoélectrique pour les galènes à nombreux cristaux, mais non pour les galènes clivées.

Précisément, ces dernières manifestaient une rectification de deuxième espèce assez douteuse. C'est que, pour celles-ci, le phénomène thermoélectrique s'opposait à la rectification, tandis qu'avec les autres il l'amplifiait. Donc rien n'autorise à penser que les forces thermoélectriques soient la cause de la rectification de deuxième espèce.

Quant à la rectification proprement dite, aux faibles énergies, il ne peut en être question. En effet le passage de trains d'ondes de 5 à 10 microjoules élève si peu la température

du contact que les forces thermoélectriques n'auraient pas une intensité suffisante pour expliquer la rectification. Du reste, avec les galènes à petits cristaux, ces forces n'ont pas le sens convenable.

Des expériences de contre épreuve faites en appuyant une pointe froide sur une galène préalablement chauffée, amènent aux mêmes conclusions.

En résumé, les *propriétés rectifiantes* des galènes sensibles *ne sont pas dues à des forces thermoélectriques*, ces forces n'ayant ni la grandeur, ni le sens voulus.

Il est par suite inutile d'insister, comme de nombreux physiciens se sont attachés à le faire (1), sur les difficultés qu'on aurait à justifier thermoélectriquement les particularités des phénomènes de sensibilisation. Indiquons seulement que des expériences récentes (2) montrent que les détecteurs à galène suivent les oscillations de période égale à 2×10^{-7} secondes. Ce seul fait suffirait à ruiner la théorie thermoélectrique de la rectification.

Par contre, il ne faut pas conclure que les phénomènes *thermiques*, au niveau d'un contact sensible, soient sans importance.

L'échauffement par effet Joule est un fait d'expérience, et cet échauffement dépend, en grandeur, du sens du courant, comme la résistance de contact. Il peut provoquer une diminution de résistance de la masse de la galène, qui d'après Eccles (3) et Murray (4), a « un grand coefficient de température négatif ».

D'autre part l'effet Peltier existe aussi. Suivant le sens du courant, le contact s'échauffe ou se refroidit, ce qui entraîne alternativement des diminutions ou des accroissements de

(1) V. Streintz. Pierce. Flowers, *op. cit.*
(2) Ettenreich. *Physikalische Zeitschrift*, 1920, p. 208.
(3) V. Eccles, *loc. cit.*
(4) *Manuel de la T. S. F.* Traduction Magniez, p. 99.

résistance. Eccles et Murray voient dans ce phénomène une explication suffisante des propriétés rectifiantes. Pourtant, des variations de résistance qui sont, au maximum, de 1 o/o par degré, ne semblent pas pouvoir, à elles seules, justifier la grande dissymétrie des caractéristiques. De plus, si le rôle des éléments chimiques dans la sensibilisation s'explique aisément par des modifications de l'effet Peltier, il n'en est pas de même des phénomènes de sensibilisation électrique. Il reste cependant que les variations de résistance par effet Joule et effet Peltier sont des faits indéniables, qui doivent intervenir dans la rectification.

Enfin l'élévation de la température provoque la *dilatation* de la galène lors du passage d'un courant. Cette dilatation, décelée de façon certaine tant par des mesures directes (1) que par des phénomènes vibratoires, accroît la pression du cristal contre la pointe et modifie la couche de contact. Les variations d'épaisseur produites entraînent des chutes de résistance. De plus la couche de gaz, dont Streintz semble bien avoir démontré l'existence, se comprimant, des bulles microscopiques peuvent s'échapper ; la pointe entre en contact plus intime avec le cristal. Ces modifications d'épaisseur et de constitution, d'origine mécanique, ne sont pas les seules que subisse la pellicule de contact. Il peut s'y ajouter des phénomènes *d'électrostriction*, c'est-à-dire des variations de volume, des déformations ou des torsions dues au champ électrique créé dans la couche de passage.

Tous ces changements ont leur répercussion sur la sensibilité qui dépend, nous l'avons vu, d'un état particulier des surfaces en contact. Dans l'essai de théorie que nous indiquerons, il y aura lieu de tenir compte de ces données, au moins à titre secondaire.

3° *Hypothèse électronique.* — Le succès de la théorie électronique dès qu'il y a des véhicules visibles, en particulier

(1) V. J. Fallou, *loc. cit.*

dans l'explication des phénomènes présentés par les lampes à trois électrodes, est tel qu'on a pensé trouver aussi dans les électrons la raison des propriétés rectifiantes de la galène.

L'hypothèse est évidemment séduisante par sa simplicité : il suffit de supposer que la création d'un champ de sens donné, dans la couche de contact séparant la galène de la pointe, favorise l'émission par la pointe d'électrons négatifs captés par la galène, ou, ce qui revient au même, l'émission par la galène d'ions positifs que la pointe absorbe ; le phénomène inverse, pour un champ de sens contraire, ne se produisant que faiblement.

Ces émissions d'électrons expliquent immédiatement les propriétés de soupape de la galène. On conçoit que les phénomènes de sensibilisation par les ondes puissent aussi se justifier. Par contre il est plus difficile d'interpréter le rôle de certains éléments chimiques, comme le soufre, et corrélativement la rareté des galènes sensibles. On doit admettre que les véhicules des électrons peuvent varier avec les impuretés de la couche de contact qui favorisent le départ des corpuscules dans un sens déterminé. Il faut donc, en quelque sorte, faire dépendre les électrons des atomes matériels, ce qui nous ramène à peu près au point où nous en étions après la critique de l'hypothèse d'une polarisation électrolytique.

En tout cas, j'ai essayé directement de mettre en évidence une émission d'ions ou d'électrons, et, dans les conditions où j'ai opéré, les résultats ont été négatifs :

Dans une ampoule vide, un cristal de galène est monté en regard d'une plaque métallique. Malheureusement la distance n'a pu être abaissée au-dessous de 1 mm. Entre le cristal et la plaque, on établit une différence de potentiel au moyen d'une batterie d'accumulateurs et un galvanomètre sensible est mis dans le circuit. Dans ces conditions, le galvanomètre ne commence à déceler un courant que lorsque le

voltage atteint 250 volts. Ce courant présente alors les mêmes dissymétries que si l'on utilise le filament et la plaque d'une lampe à trois électrodes. Or le filament de cette dernière émet très peu d'électrons dans ces conditions ; le très faible courant constaté (2×10^{-6} ampères), est dû sans doute à des déperditions par défaut d'isolement.

Si donc la galène émet des ions dans les conditions actuelles, cette émission est saturée à 300 volts et elle demeure très faible.

Du reste il se peut que lorsque la distance de la plaque se réduit à l'épaisseur d'une couche de contact, l'émission d'électrons change de caractère. Il est vrai que, dans ce cas, la différence de potentiel doit être réduite à 2 ou 3 volts, pour ne pas endommager la couche superficielle et diminuer la sensibilité.

En somme l'*expérience ne permet pas de conclure à une théorie purement électronique de la sensibilité.*

§ III. — Essai de Théorie

De l'étude critique que nous avons faite, il résulte qu'aucune des hypothèses émises n'est admissible dans la forme simple sous laquelle elle a été proposée.

Pour être pleinement acceptable, une hypothèse doit, tout d'abord, expliquer les propriétés rectifiantes des galènes sensibles. Ensuite elle doit justifier les limitations que nous avons rencontrées aux conditions de bon fonctionnement des cristaux détecteurs, limitations portant sur l'énergie et sur le potentiel. Enfin, cette hypothèse doit rendre compte d'une part des pertes de sensibilité liées à des modifications superficielles, d'autre part des phénomènes de sensibilisation soit électrique, soit chimique. Afin de satisfaire à ces diverses conditions nous avons vu que si l'on invoque l'existence de particules électrisées mobiles, il faut les accrocher à des grains de matière (atomes de soufre ou de substances analo-

gues), ou, à tout le moins, lier la présence de ces particules à celle des atomes.

Nous arrivons donc nécessairement à une hypothèse équivalente dans le fond, sinon dans la forme, à celle-ci :

1° Lorsque la cristallisation du sulfure de plomb se produit de façon anormale, par exemple avec de brusques variations de température ou de pression, provoquant des phénomènes de trempe, et en présence d'un léger excès de soufre ou d'éléments voisins (sélénium, tellure), des centres électropositifs, liés aux atomes de ces éléments, demeurent dans la couche de contact du cristal. Ces corpuscules ou grains électriques, à charge positive, sont un peu mobiles dans cette pellicule où les molécules diffusent les unes dans les autres, leur distance moyenne étant plus grande que dans le solide. D'ailleurs cette couche particulière n'est pas uniformément répandue sur le cristal ; on ne la rencontre qu'aux points où les conditions physiques et chimiques nécessaires à sa formation ont été réalisées. Pour des cristaux soumis à un traitement approprié, toute la surface peut être recouverte de la pellicule favorable. Avec les galènes naturelles, ces conditions dissymétriques se présentent fréquemment aux failles et aux arêtes, où le liquide déposant les cristaux laisse plus facilement un excès de soufre.

2° Si l'on amène au contact de cette couche une pointe métallique toujours engaînée d'électrons négatifs sur une épaisseur de 10^{-4} cm. environ (1), et si la pression exercée par cette pointe ne déchire pas la pellicule de surface, la conductibilité du système réalisé est dissymétrique.

Tout d'abord un courant de sens quelconque, traversant le contact, rassemble et oriente les centres positifs épars dans la couche superficielle qui entoure la galène. Ces centres se disposent en regard des électrons de la pointe, constituant ainsi un ensemble de condensateurs moléculaires manifestés

(1) V. Rother, *loc. cit.*

immédiatement par la grande résistance du contact. L'état de la couche de passage présente alors quelque analogie avec celui d'un diélectrique polarisé ; et d'ailleurs la loi de variation de la résistance avec la température est la même (1).

Au niveau de cette sorte de couche double, le potentiel varie de $4\pi\mu$, μ étant la somme par cm^2 des moments des doublets normaux à la surface. D'ailleurs la galène, sur laquelle se trouvent les charges positives a le potentiel le plus élevé.

Si le courant lancé à travers le contact passe de la pointe à la galène, le champ créé dans cette couche par les centres électrisés s'oppose à son passage. Au contraire, les actions s'ajoutent si le courant est de sens inverse. Ainsi s'expliquent la polarité de la conductibilité en courant continu, et les propriétés détectrices qui en sont une conséquence.

D'ailleurs le déplacement des corpuscules, la régularisation initiale de leur répartition sous l'action du courant sont des phénomènes extrêmement rapides, ce qui explique la presque totale absence d'inertie des détecteurs.

3° Supposons maintenant que, pour une même intensité efficace, la différence de potentiel mesurée aux bornes du détecteur, mis en circuit ouvert, devienne notablement plus grande. Nous avons vu que ce sont là de mauvaises conditions de rectification. Il faut le justifier.

Les condensateurs moléculaires sont soumis à une différence de potentiel trop forte qui peut déchirer certains d'entre eux. La couche de passage, subissant une attraction électrostatique excessive, se développe de façon plus ou moins permanente. Suivant le sens du courant elle est attirée vers la pointe ou refoulée vers le cristal ; mais, dans les deux cas, certains des électrons fusionnent avec des centres positifs,

(1) V. Streintz et Königsberger, *loc. cit.*

sans que la galène en libère aisément d'autres pour les remplacer.

Par suite la polarité est moins marquée, et la rectification moins bonne.

Il en va de même si un phénomène brusque et trop énergique, un train d'ondes amorties par exemple, traverse le contact. La somme des quantités d'électricité rectifiées est plus faible qu'avec un train d'ondes de moindre énergie, pour lequel l'amplitude des variations de potentiel est moindre. Corrélativement la résistance du contact diminue par réduction de la couche de passage.

Ainsi s'explique le caractère fondamental de la rectification par la galène, caractère que nous avons retrouvé au cours de toutes les expériences faites : la galène ne rectifie convenablement que pour des valeurs moyennes de l'énergie et du potentiel, ce dernier étant mesuré en circuit ouvert au niveau du détecteur.

4° Si l'on pousse l'accroissement de l'intensité jusqu'à la production d'étincelles au niveau du contact, la couche de passage est rompue, tout comme par une décharge atmosphérique violente. Le phénomène est alors celui-là même auquel Lodge a donné le nom de « cohération ». Il se forme entre la pointe et le cristal, un « pont » conducteur, d'ailleurs fragile, fait de particules solides, galène et métal fusionnés.

Dans ce cas la résistance est réduite de façon marquée et durable, et d'ailleurs les contacts adhèrent entre eux.

Le passage de courants alternatifs intenses à travers un contact de cette espèce produit les échauffements périodiques et les vibrations d'origine thermique que nous avons signalés au chapitre IV.

La conduction étant devenue presque métallique, il n'y a plus de rectification de première espèce. Nous avons vu qu'il apparaît alors une très faible rectification de sens inverse, le courant redressé variant cette fois progressivement avec l'énergie reçue. On peut penser que cette seconde rectifica-

tion est due aux variations de la résistance par effet Joule et Peltier, et par compression thermique ou électrique de la couche de passage. Ces phénomènes, nous l'avons dit plus haut, sont par leur petitesse et leur régularité, hors de proportion avec la rectification de première espèce. Ils peuvent au contraire expliquer très convenablement la rectification de seconde espèce qui est faible et constante.

Les phénomènes électriques intenses ne sont évidemment pas les seuls qui détruisent la couche de contact. Par voie mécanique ou chimique on peut arriver au même résultat. En particulier la présence d'une base ou d'un acide étendu, en amenant des ions négatifs ou en dissolvant le soufre en excès, suffit à détruire la sensibilité.

5° Nous avons vu, dès le début, comment se justifie la sensibilisation chimique artificielle qui ne semble pas différer beaucoup de celle des cristaux naturels.

Quant à la sensibilisation électrique elle s'explique aussi et, en fait, elle se produit toujours au début du passage d'un courant. Toutefois les petites secousses superficielles dues aux ondes peuvent vaincre la viscosité du milieu et l'inertie des centres électrisés, de façon plus parfaite que le courant continu qui se borne à traverser le contact pour pénétrer en profondeur. Sous l'action de ces nombreux chocs, les particules disséminées de façon quelconque dans la couche de contact s'ébranlent, s'agglomèrent près de la pointe, se répartissent et s'orientent de façon convenable.

La sensibilité du détecteur obtenu est d'autant plus grande que les corpuscules électrisés sont plus nombreux et plus mobiles dans la couche de contact.

Auerbach ne croyait-il pas que l'action des trains d'ondes sur les cohéreurs métalliques pouvait être assimilée à celle de chocs rythmés qui, eux aussi, provoquent la cohération ? On peut voir là non seulement une image mécanique de la sensibilisation par les ondes, mais une réalité, les phénomènes d'électrostriction entraînant des déformations pério-

diques de la couche de contact, qui peuvent d'ailleurs s'ajouter aux vibrations thermiques qu'une amplification acoustique permet de déceler pour de fortes intensités.

Donc l'hypothèse proposée rend compte de toutes les particularités que présentent les propriétés rectifiantes des galènes.

RÉSUMÉ

Les recherches expérimentales que je viens d'exposer ont porté principalement sur le fonctionnement des galènes détectrices.

Après avoir construit, en courant continu, les caractéristiques de divers échantillons de galènes naturelles ou sensibilisées, j'ai étudié la rectification par ces cristaux des courants alternatifs ou interrompus, des courants d'ondes de haute fréquence, et des trains d'ondes amorties. Les résultats ont été conformes à ce que les caractéristiques faisaient prévoir.

Dans les divers cas, j'ai mis en évidence une propriété fondamentale de la galène : la rectification ne se produit dans de bonnes conditions que si *l'énergie du courant reste faible*, et si la différence de potentiel aux bornes du détecteur, mesurée alors qu'il est en circuit ouvert, ne dépasse pas une certaine limite.

Ce résultat n'apparaît nettement dans aucune des études antérieures.

Aux fortes énergies j'ai constaté une rectification faible et de sens inverse de celle qui se produit aux faibles énergies. Je crois avoir été la première à signaler [1] ce renversement du courant rectifié que présentent les galènes sensibles. J'ai donc mis en évidence *deux modes de rectification* du cristal.

Il résulte de ces faits que les galènes sont inutilisables

[1] *C. R.*, 1916, t. CLVIII, p. 1994, et 1920, t. CLXX, p. 1489.

dans un circuit de réception où l'on se propose de mesurer l'énergie des ondes reçues.

Ensuite le changement de sens de la rectification, lorsque l'énergie croît, permet de caractériser les galènes sensibles autrement que par les dissymétries en courant continu, ou l'essai au buzzer. Si l'on utilise par exemple des trains isolés d'ondes amorties, il suffit de faire varier l'induction mutuelle des circuits pour constater, avec les cristaux sensibles, un renversement du courant rectifié par lequel on distingue ces galènes des cristaux non sensibles.

Bien que la partie principale de mon travail porte sur la détection, j'ai été amenée à m'occuper des *phénomènes vibratoires* accompagnant le passage des courants alternatifs de basse et de haute fréquence. J'ai étendu l'étude de ces phénomènes (signalés en 1913 par divers auteurs), aux ondes entretenues, en me servant du matériel moderne de T. S. F., et, en particulier, j'ai utilisé ainsi la galène à la reproduction directe de la voix.

Enfin, ayant rapproché les résultats de mon travail de ceux des recherches antérieures, j'ai cherché à construire une hypothèse qui rende compte des faits précédents et des modifications de la sensibilité. Cette étude critique m'a conduite à regarder comme probable l'existence d'éléments électropositifs dans la couche superficielle des galènes sensibles. Ces corpuscules, dont la présence est liée à celle des atomes de soufre, peuvent expliquer la conductibilité unipolaire des cristaux sensibles, les conditions de leur bon fonctionnement comme détecteurs et les divers phénomènes de sensibilisation.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

INTRODUCTION 1

HISTORIQUE 3

CHAPITRE PREMIER. — **Lames cristallines** 9

§ I. — Faibles durées 11

§ II. — Durées prolongées 14

Remarques. 19

CHAPITRE II. — **Etude des galènes en courant continu** . . 22

§ I. — Contact par pointes. Lien entre les dissymétries et les propriétés détectrices. 24

§ II. — Caractéristiques de détecteurs à galènes . 30

§ III. — Phénomènes d'induction 38

Conclusions 41

CHAPITRE III. — **Etude des galènes en courant alternatif de basse et de haute fréquence** 42

§ I. — Courant alternatif. 42

§ II. — Ondes entretenues 47

§ III. — Courant interrompu périodiquement. . . 53

§ IV. — Ondes amorties 54

Conclusions 61

CHAPITRE IV. — **Courants alternatifs et vibrations sonores.** 62

§ I — Courant alternatif 63

§ II. — Courant interrompu périodiquement . . . 66

§ III. — Ondes entretenues 69

§ IV. — Ondes amorties 74

Conclusions 76

CHAPITRE V. — **Hypothèses sur les causes de la sensibilité** 77

§ I. — Sensibilité. 77

§ II. — Hypothèses antérieures 84

§ III. — Essai de théorie 92

RÉSUMÉ 97

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

GLYCÉRIDES. — **Etude des propriétés physiques en couche mince de quelques-uns de ces corps et de leurs mélanges.**

VU ET APPROUVÉ :
Strasbourg, le 16 décembre 1920.
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Signé : E. BATAILLON.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :
Strasbourg, le 17 décembre 1920.
Le Recteur,
Signé : S. CHARLÉTY.

LAVAL. — IMPRIMERIE L. BARNÉOUD ET Cie.